

Titre: Établissement des courbes de dégradation des conduites des réseaux sanitaires: Méthodologie et étude de cas à Verdun et Ste-Hyacinthe au Québec, Canada
Title:

Auteur: Alain Lubini Tshumuka
Author:

Date: 2010

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Lubini Tshumuka, A. (2010). Établissement des courbes de dégradation des conduites des réseaux sanitaires: Méthodologie et étude de cas à Verdun et Ste-Hyacinthe au Québec, Canada [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/477/>
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/477/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Musandji Fuamba
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTABLISSEMENT DES COURBES DE DÉGRADATION DES CONDUITES
DES RÉSEAUX SANITAIRES : MÉTHODOLOGIE ET ÉTUDE DE CAS À
VERDUN ET STE-HYACINTHE AU QUÉBEC, CANADA

ALAIN LUBINI TSHUMUKA

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉE
(GÉNIE CIVIL)
DÉCEMBRE 2010

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉTABLISSEMENT DES COURBES DE DÉGRADATION DES CONDUITES
DES RÉSEAUX SANITAIRES : MÉTHODOLOGIE ET ÉTUDE DE CAS À
VERDUN ET STE-HYACINTHE AU QUÉBEC, CANADA

Présenté par : LUBINI TSHUMUKA Alain

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. MAHDI Tew- Fik, Ph.D, président

M. FUAMBA Musandji, Ph.D, membre et directeur de recherche

Mme TARDIF Isabel, MGP, membre

DÉDICACE

A mon épouse, Michelle, pour avoir consenti des sacrifices, je dédie cette dissertation

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail de maîtrise, nous tenons à remercier le professeur Musandji Fuamba pour sa disponibilité ainsi que l'encadrement qu'il nous a offert tout au long de sa réalisation. Nous disons également merci à tous les professeurs du département d'hydraulique qui nous ont accompagnés durant notre parcours à l'École Polytechnique de Montréal.

Nous adressons également nos sincères remerciements à M. Michel Brodeur du département de génie de la ville de saint Hyacinthe pour les données d'inspection et les rapports qu'il a mis gracieusement à notre disposition afin que ce travail se réalise. Nous sommes reconnaissants de l'assistance que M. Bertrand Viens nous a offerte dans le traitement des données.

Nous devons également une fière chandelle à M. France Bernard et Guy Larocque de l'arrondissement de Verdun pour nous avoir permis non seulement d'accéder aux rapports d'inspections mais aussi de travailler dans les locaux du service de génie.

Nous remercions en fin tous nos collègues pour nous avoir prêté une oreille attentive chaque fois que cela était nécessaire.

RÉSUMÉ

La plupart des municipalités au Canada font face à des problèmes liés à la détérioration des conduites d'assainissement urbain.

Le gouvernement du Québec demande ainsi aux municipalités de pouvoir atteindre un taux de remplacement annuel de 1% afin de rencontrer les objectifs du plan national de l'eau lancé en 2002. Étant donné les contraintes budgétaires, les municipalités ne sont pas toujours en mesure d'effectuer des inspections télévisées (CCTV) afin de prévoir le moment d'intervention dans leur réseau. De ce fait, il paraît tout indiqué dans ce travail d'élaborer un modèle probabiliste devant permettre de déterminer le niveau d'opération et entretien des conduites. Basé sur la régression logistique multinomiale, le modèle montre la détérioration des conduites des différents matériaux en fonction du temps. Le modèle développé a permis de prédire correctement dans 54% de cas la probabilité de transition impliquant une conduite à l'état 1(excellent) et 2 (bon) alors que 59% des cas ont été prédits avec succès pour les probabilités de transitions impliquant une conduite à l'état 3 (acceptable) pour deux municipalités du Québec. Ce modèle est suggéré parmi d'autres outils, pour aider les gestionnaires à anticiper le dysfonctionnement des réseaux.

ABSTRACT

Sewer deterioration is of concern in most municipalities in Canada in such a way that the provincial government of Quebec is asking for a renewal of those facilities at a 1% rate in order to meet the goals of the national water plan elaborated in 2002. Under already challenging budget constraints, those municipalities cannot always afford the use of CCTV inspections to prepare their intervention. This paper describes a probabilistic model which is proposed to help assess the current conduit' operational and maintenance condition. Based on the multinomial logistic regression, the model shows the temporal deterioration of conduits for different types of materials. This model was successfully applied to a case study in Quebec. On average, it predicted correctly 54% of outcomes for transition probabilities involving both condition classes 1 (excellent) and 2 (good) while 59% were correctly predicted for condition class 3 (fair). It is suggested among other tools to assist sewer system managers in anticipating failures.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XII
LISTE DES ANNEXES	XIV
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Les modèles.....	3
1.1.1 Modèles déterministes.....	3
1.1.2 Modèle centré sur l'intelligence artificielle	4
1.1.3 Modèle statistique	7
1.2. Les défaillances de réseau d'assainissement.....	9
1.2.1. Détérioration structurale.....	10
1.2.2. Détérioration hydraulique	13
CHAPITRE 2 ORGANISATION GÉNÉRALE DU DOCUMENT	15
CHAPITRE 3 MODELING OF HISTORICAL DETERIORATION OF SEWER SYSTEM CONDUITS.....	16
3.1. Introduction	17
3.2. Developed hydraulic deterioration model	22

3.3. Case study: application of the logistic regression approach for Verdun and Saint Hyacinthe data sets	28
3.4. Conclusion and recommendations	42
CHAPITRE 4 ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES COMPLÉMENTAIRES.....	43
4.1. Description des sites.....	43
4.1.1 Saint Hyacinthe	43
4.1.2 Verdun.....	45
4.2. Application de la régression logistique	46
CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE	50
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	55
BIBLIOGRAPHIE	55
ANNEXES.....	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1.1. Résistance des conduites à la corrosion	11
Tableau 2.1.2. Principaux défauts structuraux des divers types de conduite	11
Table 3.1 Variables description Tableau 3.1	29
Tableau 3.2 Estimation result for ordered logit model.....	30
Tableau 3.3 Log –likelihood test.....	31
Tableau 3.4 Percentage correctly predicted	33
Tableau 3.5 Wald test.....	33
Tableau 3.6 Insufficient hydraulic capacity for the 5 year return period, Chicago storm.....	40
Tableau 3.7 Theoretical Manning coefficient	40
Tableau A. Analyse des résidus - paramètres estimés	60
Tableau B. Shapiro-Wilk W Test.....	60

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 Methodology Steps	22
Figure 3.2 Transition probabilities-condition state 1	35
Figure 3.3 Transition probabilities-condition state 2	36
Figure 3.4 Transition probabilities-condition state 3	36
Figure 3.5 Operational condition grade vs. age	38
Figure 3.6 Manning coefficient Vs operational grade.....	41
Figure 4.1 Localisation de la ville de Saint Hyacinthe	43
Figure 4.2 Répartition des matériaux utilisés.....	44
Figure 4.3 Localisation de la municipalité de Verdun dans la ville de Montréal	45
Figure 4.4 Matériau des conduites du réseau de Verdun	46
Figure 4.5 Ecran de specification de modèle (JMP 8)	47
Figure 4.6 Modèle de régression pour la classe 1	48
Figure 4.7 Modèle de régression pour la classe 2	48
Figure 4.8 Modèle de régression pour la classe 3	49
Figure 5.1 Probabilité de transitions pour la classe 1 (Béton).....	51
Figure 5.2 Probabilité de transitions pour la classe 2 (Béton).....	52
Figure 5.3 Probabilité de transitions pour la classe 3 (Béton).....	52
Figure 5.4 Probabilité de transitions pour la classe 1 (Béton armé).....	52
Figure 5.5 Probabilité de transitions pour la classe 2 (Béton armé).....	53
Figure 5.6 Probabilité de transitions pour la classe 3 (Béton armé).....	53
Figure 5.7 Probabilité de transitions pour la classe 1 (Grès)	53
Figure 5.8 Probabilité de transitions pour la classe 2 (Grès)	54
Figure 5.9 Probabilité de transitions pour la classe 1 (Grès)	54

Figure (a.1) Residus classe 1	59
Figure (a.2) Residus classe 2	59
Figure (a.3) Residus classe 3	59
Figure (a.4) Valeurs prévues Vs Résidus de Student	61

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

- CA: Ciment amiante
- CBR: Case based reasoning
- CCTV: Closed Circuit Television
- CERIU : Center d'étude et de recherche en infrastructures urbaines
- CMHC: Canada Mortgage and Housing Corporation
- MACP: Manhole Assessment and Certification Program
- MCMC: Markov Chain Monte Carlo
- NASSCO: National Association of Sewer Service Companies
- NN: Neural Network
- OLS: Optimal least square
- PACP : Pipeline Assessment and Certification Program
- PEHD : Polyéthylène haute densité
- PVC : Polyvinyle de chlorure
- PT_{nn} : Probabilité de transition de la classe n vers n
- TBA : tuyau en béton armé
- TCA : tuyau en ciment amiante
- WRc: Water Research center
- π_{jk} : odd ratio; il signifie rapport de chance ou rapport de cotes permettant de mesurer le degré de dépendance entre les variables.
- $P(Y \leq j|X)$: probabilité cumulative pour que Y soit inférieure ou égal à j, avec j variant de 1 à 3 étant donné qu'il existe 4 catégories (scores) indiquant le niveau de détérioration.
- β_j : coefficient de régression obtenue par la méthode de maximum de vraisemblance
- α : ordonnée à l'origine

- θ : valeur seuil (ou threshold)
- F: fonction de répartition cumulative logistique
- Logit : fonction logistique, logarithme de la « chance » qu'un événement intervienne
- ε : variable aléatoire qui représente les influences non-négligeables mais aussi non-mesurables du milieu sur la variable.
- y^* : Combinaison linéaire des facteurs qui déterminent la classe d'une conduite (son score)

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Analyse des résidus.....	59
ANNEXE 2 : Exemple des données utilisées.....	62
ANNEXE 3 : Plans des réseaux de Verdun et Saint Hyacinthe (Bassin Douville).....	63

INTRODUCTION

Le réseau d'égout et d'aqueduc au Canada est dans un état fort avancé de dégradation. Ce constat a été fait depuis plusieurs années. Pour répondre à cette problématique, le gouvernement du Québec en 2002 a dû mettre en place un plan national de l'eau. Ce plan se décline à travers cinq grandes orientations parmi lesquelles se trouvent l'assainissement et l'amélioration des services de l'eau. Pour réaliser les objectifs de ce programme, le gouvernement du Québec par le biais du Ministère des affaires municipales, Régions et occupation du territoire (MAMROT) incite l'ensemble des municipalités à atteindre un taux de renouvellement de leurs réseaux de 1% d'ici 2012.

Là où une inspection visuelle n'est pas possible, les municipalités recourent à des inspections par CCTV (closed circuit television). En dépit du fait d'être efficace, cette pratique est très onéreuse et ne rencontre pas toujours le budget des municipalités. Ainsi, trouver la solution optimale aux nombreux problèmes liés à la gestion des égouts représente un réel défi pour les gestionnaires et les décideurs des réseaux d'assainissement.

La détermination de l'état structural et fonctionnel de ces infrastructures de première importance en vue de leur réhabilitation ou remplacement passe par une meilleure compréhension du processus de détérioration qui s'installe au fil des années.

Ceci implique l'évaluation fréquente des conditions structurales et hydrauliques des conduites, une standardisation du système de pointage et le développement ou la mise à jour des modèles prévisionnels connus.

Pour ce faire, il nous paraît essentiel d'élaborer un outil simple permettant de prévoir l'évolution de l'état de dégradation des conduites en fonction du temps. Cet outil devra permettre de prédire l'état hydraulique des conduites notamment en ce qui concerne leur habilité à drainer le débit de design. Le modèle probabiliste développé à partir de la régression logistique multinomiale repose sur certaines caractéristiques intrinsèques de la conduite : l'âge, le type des matériaux, le type d'effluent et le diamètre. Le produit final se présente comme une alternative à d'autres moyens d'évaluation existants, offrant de ce fait la possibilité de pouvoir anticiper le moment d'intervention dans le réseau et donc de réduire les effets néfastes liés aux bris intempestifs des conduites.

Objectif général

L'objectif poursuivi dans ce travail est de dériver des courbes de dégradation des conduites d'égout à partir d'une analyse détaillée des inspections télévisées disponibles pour la municipalité de Verdun et la ville de St Hyacinthe. Ces courbes fourniront une indication sur l'évolution de la perte de la capacité hydraulique en fonction du temps.

Objectifs spécifiques

1. Analyser l'état des réseaux sur base des données disponibles (Inspections télévisées et rapports y afférents) en appliquant le protocole du NASSCO/ CERIU.
2. Déterminer les matrices de transition d'un état détérioré vers un autre plus détérioré au moyen de la régression logistique ordonnée.

Hypothèse

La prise en compte du processus de vieillissement dans la modélisation hydraulique des réseaux d'assainissement urbain devra aboutir à une meilleure évaluation des performances hydrauliques de ces derniers et ainsi prédire le moment d'intervention.

Le modèle de détérioration auquel ce travail aboutit ne prend pas en compte le programme d'entretien et de maintenance pouvant exister au niveau des municipalités considérées. L'existence de ces programmes contribue certainement à la correction de certains défauts apparents lors des inspections.

Justification : Dans la pratique actuelle de modélisation des réseaux existants avec des outils comme PCSWMM, les paramètres hydrauliques utilisés sont des paramètres par défaut, donc ne prenant pas en compte l'état réel du réseau.

CHAPITRE 1 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE

Plusieurs modèles ou méthodes ont été utilisés à ce jour pour établir des courbes de dégradation des conduites. Dans la plupart des cas, ces modèles ont été établis sur la base de la détérioration structurale et la détérioration hydraulique n'a pas fait l'objet de beaucoup de travaux. Dans les lignes qui suivent une revue critique de certains travaux réalisés en appliquant l'un ou l'autre modèle est faite afin de montrer la pertinence de la méthodologie choisie.

1.1 Les modèles

Morcous et al. (2002b) ont classé les modèles de détérioration des infrastructures en trois grands groupes. Il est à noter que les frontières entre les différents groupes ne sont pas toujours étanches. Ils les ont ainsi repartis en modèles déterministes, modèles statistiques et modèles centrés sur l'intelligence artificielle.

1.1.1 Modèles déterministes

Les modèles déterministes sont compris comme des modèles mathématiques déterminés entièrement par des équations. La problématique du déterminisme peut s'énoncer comme suit: l'état d'un système au temps t_1 détermine-t-il son état au temps t_2 ultérieur ? (Mussy, 1998). On peut ranger les modèles déterministes en 2 sous groupes :

- Régression linéaire

La régression est un modèle mettant en relief la relation qui existe entre une variable expliquée (variable dépendante) et une variable indépendante.

D'un point de vue mathématique, cette relation peut être généralisée comme l'indique l'équation ci-dessous

$$Y_i = a_0 + a_1X_{i1} + a_2X_{i2} + \dots + a_pX_{ip}$$

Y_i est la variable dépendante et X_{i1}, \dots, X_{ip} , sont des variables indépendantes.

Cette relation permet donc de pouvoir déterminer l'évolution de la variable Y_i , qui dans le cas des conduites d'assainissement représente l'état de la conduite, en fonction de plusieurs paramètres notamment l'âge, l'état hydraulique, le niveau de trafic, le niveau de la nappe phréatique, etc.

Chungtai et al (2008) ont mis en place des équations de régression multiple permettant d'évaluer l'état des conduites en fonction de facteurs influençant leur dégradation à savoir des facteurs physiques, opérationnels et environnementaux. À partir des données recueillies auprès de deux municipalités canadiennes, ils ont été en mesure d'établir des courbes de dégradation, lesquelles ont été validées avec une précision de 82 à 86%.

Ce modèle a le désavantage de représenter le phénomène responsable de la détérioration des conduites de manière linéaire alors que ce processus est non linéaire. De plus, ce modèle simple ne reflète pas la nature probabiliste de bris de conduite, lesquels sont en réalité une combinaison des facteurs notés ci haut et l'occurrence d'un événement aléatoire (Morcous et al. 2002b).

- Régression exponentielle

Le modèle exponentiel se présente de la manière suivante :

$$y_i = e^{\beta_1 + \beta_2 + \epsilon_i}$$

Il se calibre généralement par la technique de moindres carrés et ses résultats sont donnés en forme de courbe exponentielle.

Mailhot et al. (2000) ont élaboré un modèle simple devant permettre de simuler l'évolution pour les vingt prochaines années de la longueur de conduites en mauvais état. Pour ce faire, les auteurs ont associé à la fonction de risque la distribution de Weibull. Le seul paramètre qu'ils ont pris en compte est l'âge de la conduite, ce qui rend le modèle assez limitatif dans l'interprétation des résultats étant donné le rôle important que jouent les autres facteurs dans le processus de détérioration tel que souligné ci haut.

1.1.2 Modèle centré sur l'intelligence artificielle

Le concept intelligence artificielle a été proposé pour la première fois au congrès de Dartmouth en 1956 pour désigner le domaine de recherche qui s'ouvrait alors. Il renvoie au projet de mise en œuvre de modèles rendant des machines capables de résoudre des problèmes, au sens où la résolution de ces problèmes n'est pas complètement codée et déterminée a priori, mais où elle est le résultat d'une construction originale par la machine (Balacheff, 1994). Dans cette famille des modèles, le réseau des neurones, la logique floue et le raisonnement à base de cas (CBR) ont fait l'objet d'application extensive dans la simulation de la détérioration des conduites.

- Logique floue

Cette théorie a été introduite en 1965 par Lotfi Zadeh (Berkley) et puise ses origines en logique multivalente et en mécanique quantique.

La logique floue est une des techniques de l'Intelligence artificielle permettant de formaliser simplement et intuitivement le fonctionnement des systèmes complexes. Ainsi elle permet de modéliser les notions vagues du langage naturel (ex : excellent, très bien, bien) pour palier à l'inadéquation de la théorie des ensembles classiques. Ce concept introduit la notion de degré d'appartenance à un sous ensemble tel que défini ci-dessous

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in R\}$$

Où $\mu_A(x)$ est le degré d'appartenance de x à l'ensemble A , avec $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$

$\mu_A(x)=1$ signifie que x appartient totalement à A et $\mu_A(x)=0$ pas du tout.

Rajani et al. (2006) ont établi un système de cotation de l'état structural des conduites à partir des inspections télévisées. Ils ont traduit l'ampleur de défauts observés en ensemble flous. La note globale ainsi accordée à une conduite eu égard aux défectuosités rencontrées lors des inspections est obtenue au moyen d'un système de pondération.

Kleiner et al.(2006b) ont utilisé pratiquement le même raisonnement que celui énoncé ci haut afin de parvenir d'abord à un système de cotation puis par la suite prédire l'évolution de la conduite par le biais des chaînes de Markov.

L'un des désavantages de cette méthode est de pouvoir recourir malgré tout à une opinion d'experts lorsqu'il est question d'établir les règles de déduction, la subjectivité intervient donc à ce niveau.

- Le réseau des neurones

Le réseau des neurones ont des applications dans plusieurs types d'industries allant de l'industrie pharmaceutique à l'industrie aéronautique. Ces industries partagent un point commun dans leur intérêt pour le réseau des neurones, à savoir: les processus pour lesquels on désire émettre des prédictions comportent de nombreuses variables explicatives et surtout, il existe possiblement des

dépendances non-linéaires de haut niveau entre ces variables qui, si elles sont découvertes et exploitées, peuvent servir à l'amélioration de la prédiction du processus (Apstat Technologies, 2002).

Les exemples d'application de cette méthode dans le domaine de la gestion des infrastructures souterraines peuvent être retrouvées dans les travaux réalisés par Moselhi et al.(2000), spécialement la classification des défauts des conduites; Al-Barqawi et al.(2006), pour ce qui est de la détérioration et la gestion des conduites d'eau.

Parmi les désavantages de cette technique on peut citer le fait que ce modèle nécessite un grand nombre de données; la détermination de la structure du réseau des neurones, qui naturellement affecte la capacité de prédiction est fastidieuse et demande beaucoup de temps (Leung et al. 2003; Kuncheva 2004; Curry and Morgan 2006).

- Le raisonnement à base de cas

Le raisonnement à base de cas (CBR) est une approche de résolution de problèmes qui utilise des expériences passées pour résoudre de nouveaux problèmes (LEA 96). L'ensemble des expériences forme une base de cas. Typiquement un cas contient au moins deux parties: une description de situation représentant un "problème" et une "solution" utilisée pour remédier à cette situation. Les techniques CBR permettent de produire de nouvelles solutions en extrapolant sur les situations similaires au problème à résoudre. Cette approche est adéquate pour les domaines où la similarité entre les descriptions de problèmes nous donne une indication de l'utilité des solutions antécédentes (Lamontagne et al.2002).

Ce type de modélisation a été utilisé dans l'étude réalisé par Hahn *et al.* (1999) en vue de prioriser les inspections dans un réseau d'égouts en se basant sur l'opinion des experts.

On peut dès lors entrevoir la subjectivité dans le processus décisionnel ainsi que l'impératif de disposer d'une banque de données importantes afin de parvenir à des conclusions acceptables.

1.1.3 Modèle statistique

Les modèles statistiques ou stochastiques sont des modèles mathématiques décrits entièrement ou partiellement par des équations de probabilité. Ils simulent des processus qui dépendent en partie ou totalement du hasard. Contrairement au modèle déterministe, une même entrée du modèle ne donnera pas deux fois la même sortie. Les exemples des modèles stochastiques les plus simples sont les séries temporelles où la variable en un instant donné est fonction de ses valeurs aux instants précédents et d'une erreur aléatoire. Dans ce cas, la fonction qui relie les valeurs de la variables en différents temps est déterministe et l'erreur est stochastique (Mussy, 1998). Dans le domaine de la gestion des infrastructures urbaines, le modèle de Markov est le modèle stochastique le plus utilisé, cependant les modèles s'appuyant sur les régressions logistiques ont également fait leur chemin dans certains travaux.

- Modèle de Markov

Une chaîne de Markov est un processus aléatoire portant sur un nombre fini d'états, avec des probabilités de transition sans mémoire. La probabilité de passer d'un état à un autre plus détérioré dépend uniquement de l'état actuel et non pas de son état passé (Ross, 2000). Cette propriété peut être exprimée de la manière suivante pour tous les états $i_0, i_1, \dots, i_{t-1}, i_t, i_{t+1}$ et pour tout $t \geq 0$

$$P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t)$$

On représente une chaîne de Markov avec une matrice de transition. Chaque rangée de la matrice correspond à un état et donne la probabilité de passer à un autre état.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ 0 & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & P_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La somme des éléments dans chacune des rangées est égale à l'unité et l'ordre de la matrice correspond au nombre d'états possibles. Il convient de noter qu'une conduite ne peut passer d'un état plus dégradé vers un autre moins dégradé.

Le calcul de la matrice de transition est une étape cruciale dans cette méthode, et pour ce faire des techniques d'optimisation sont utilisées afin de parvenir à des résultats aussi proches que possible des observations.

Ainsi Wirahadikusumah et al. (2001) ont recouru à une technique d'optimisation qui consistait à minimiser la distance entre la note globale obtenue avec le modèle exponentiel et celle que donne le modèle de Markov.

Kleiner (2001) a appliqué ensuite un modèle semi Markov pour la détérioration des conduites en incorporant le temps d'attente, c.à.d. le temps que passe une conduite dans un état donné avant de pouvoir évoluer vers un autre état plus détérioré. Le fait de modéliser le temps comme variable aléatoire est une amélioration par rapport au travail de Wirahindikusumah (2001). Son travail cependant n'a pas été réalisé sur un réseau réel par manque des données, la comparaison des résultats reste de ce fait hypothétique.

Cherchant à prédire la détérioration d'un réseau d'égout pluvial dans une municipalité de Newcastle en Australie, Micevski et al (2002) sont arrivés à optimiser un modèle de Markov au moyen de la technique bayésienne de Monte Carlo (MCMC). La validation de leur modèle a donné des résultats proches des observations, ce qui a permis de déterminer la condition future de toute la population ou un groupe des conduites du réseau concerné.

Au regard des limitations relevées dans les différentes études mentionnées ci haut, notamment l'hypothèse d'un changement d'état unique pendant une période de transition ou les inconsistances constatées avec l'optimisation basée sur la régression, Baik et al (2006) ont dû recourir à l'approche probit ordonné couplé avec un modèle incrémental pour estimer les probabilités de transition. D'un point de vue statistique le modèle élaboré est plus robuste, cependant les résultats obtenus ont montré une faible valeur du « goodness of fit ».

D'une manière générale on peut dire ce qui suit en termes d'avantages pour les modèles statistiques :

- Étant donné que l'état des conduites est défini par des entiers naturels (allant de 1 à 5), ces méthodes se prêtent assez bien à leur manipulation ;
- Elles prennent en compte la nature probabiliste du processus de détérioration

En dépit des avantages, ces modèles posent néanmoins un problème en ce qui concerne leur validation, les données sont souvent insuffisantes. Les résultats seraient probants si on disposait de plusieurs observations pour la même conduite (Baik et al 2006).

Afin de parvenir aux objectifs fixés, il est important de comprendre le processus qui entoure la détérioration des infrastructures souterraines, c'est ce qui fait l'objet de la section suivante.

1.2 Cadre théorique

1.2.1 Les défaillances de réseau d'assainissement

Les réseaux d'assainissement urbain sont constitués d'un ensemble de composantes hydrauliques comprenant des conduites, des regards, des puisards, des stations de pompage, des bassins de rétention et divers ouvrages de contrôle. Leur mission principale est la collecte et l'évacuation adéquate des eaux usées vers une station de traitement ou vers un lieu de déversement approprié (Bengassem, 2001).

La mission qui leur est assignée traduit l'importance que ces infrastructures revêtent d'un point de vue social et économique, d'où l'impérieuse nécessité de pouvoir les garder dans un état de fonctionnement optimal. Comme tout autre ouvrage de génie, elles sont l'objet de défaillances dont les causes pourraient être recherchées dans le type des matériaux qui les constituent, le type d'effluent qu'ils évacuent, l'environnement dans lequel ils reposent, etc.

Le Water Research Center - WRc (1986) affirme que la détérioration des conduites est un processus complexe et stochastique. En effet, bon nombre d'événements qui l'influencent sont de nature aléatoire notamment la pluie, les excavations survenues pendant la durée de vie de la conduite ou voir même les tremblements de terre. Le WRc, catégorise le type de détérioration en détérioration structurale et détérioration hydraulique. Cette classification, par ailleurs largement utilisée à travers le monde, a été adoptée dans l'ensemble avec quelques modifications par des organismes Nord – américains comme NASSCO ou CERIU.

Dans les lignes qui suivent nous allons aborder les causes des défaillances structurales et fonctionnelles (hydrauliques) rencontrées dans le réseau d'assainissement urbain.

1.2.2 Détérioration structurale

La défaillance structurale des égouts sanitaires est souvent occasionnée par des attaques du H_2S (liée à l'effluent), le vieillissement naturel (âge) et d'autres facteurs comme le défaut de design, une surcharge excessive, la nature du sol et les activités tectoniques ou sismiques. Le WRc décrit le processus de détérioration en 3 phases :

- La phase d'initiation qui commence par un défaut mineur (ex fissuration);
- La phase de développement qui se produit à la suite d'une combinaison de plusieurs éléments et finit par renforcer le défaut observé à l'étape initiale. Ces éléments peuvent être une attaque chimique, l'effet des charges statiques et dynamiques, l'érosion ou une perte de sol.
- La phase d'achèvement qui constitue le point culminant de la détérioration. Cette phase est atteinte à la suite d'un événement aléatoire comme une excavation dans le voisinage immédiat de la conduite, une surcharge excessive ou même un événement tectonique ou sismique. Il convient de noter que le processus ne s'accomplit pas avec la même célérité ou n'affecte pas toutes les conduites avec une acuité semblable comme le montre le tableau 2.1. En effet, il dépend grandement d'autres facteurs comme le type de matériau, le diamètre de la conduite, la longueur de la conduite, la profondeur de pose, etc. La dégradation structurale se manifeste par l'apparition des plusieurs défauts dont les plus habituels sont repris dans le tableau 2.2 en tenant compte du type de matériau. Ci-dessous, nous reprenons les 9 principaux défauts structuraux apparents tels que donnés par le CERIU (CERIU-version 4.3.1 VF, 2001).

i) Cassure

Une cassure est une fissure traversante ou ouverte de plus de 5 mm de largeur. Les cassures sont souvent accompagnées d'une déformation et de signes d'infiltration (traces de sol).

ii) Fissures

Les fissures sont des défauts superficiels fermés qui ne font pas plus de 5 mm de largeur et qui n'entraînent pas de déplacement transversal de la paroi de la conduite. Il est difficile de distinguer les fissures des cassures lorsque les cassures sont fermées du côté intérieur de la paroi.

Tableau 2.1.1. Résistance des conduites à la corrosion

Types de corrosion	Conduites			
	Béton	Tôle ondulée	PEHD	PVC
Corrosion due aux acides	✓	✓	✓ Note(1)	
Corrosion due aux ions sulfates	✓			
Corrosion due aux ions chlorures	✓	✓		
Lixiviation	✓			
Corrosion biologique	✓	✓	✓ Note(2)	✓ Note (2)
Corrosion due aux solvants			✓ Note(1)	✓ Note (3)
Fissuration sous l'effet des contraintes environnementales			✓	

Tableau 2.1.2. Principaux défauts structuraux des divers types de conduite

Type des défauts	Type de conduite		
	Conduite rigide	Conduite rigide	Conduite métallique
Cassure	✓	✓	✓
Fissure	✓	✓	-
Déformation	✓	✓	✓
Effondrement	✓	✓	✓
Bris de conduite	✓	✓	✓
Déplacement des joints	✓	✓	✓
Ouverture des joints			
Domage superficiel			
Flambage localisé	-	✓	✓
Corrosion	-	-	✓
Ecaillage	✓	-	-
Usure	✓	✓	✓
Affaissement	✓	✓	✓

iii) **Déformation**

Une conduite déformée présente une aire transversale réduite. Une conduite flexible de section circulaire prend, lorsqu'elle est déformée, une forme elliptique. Les déformations peuvent entraîner une réduction du débit hydraulique et une surcharge de certains tronçons. Dans les conduites rigides, les déformations sont généralement accompagnées de fissures et de cassures. Par contre dans les conduites flexibles, les déformations sont caractérisées par une réduction de la hauteur (ou une augmentation de la largeur) de l'aire transversale.

iv) **Effondrement**

Lorsqu'une conduite flexible affiche une variation de diamètre de plus de 25% (courbure inversée) ou lorsqu'une conduite rigide a perdu son intégrité structurale, l'effondrement est réputé avoir eu lieu.

v) **Bris de conduite**

Il y a bris de conduite lorsque la conduite présente un trou de plus de 100 mm de diamètre ou, s'il s'agit d'un défaut rectangulaire de plus de 100 x 100mm ou l'équivalent. Dans le cas d'un bris, les morceaux de conduite se détachent de la paroi. Ces bris se produisent généralement lorsque des cassures multiples surviennent à l'emplacement ou à proximité des joints déformés, mais ils peuvent aussi se produire au moment de la construction.

vi) **Déplacement des joints**

Il y a déplacement des joints lorsque la conduite présente un déplacement latéral (perpendiculairement à l'axe de la conduite) à l'emplacement d'un joint, ce qui se traduit par un changement abrupt dans la paroi à cet endroit. Un joint déplacé peut être ouvert ou non (emboîtement détaché). Le déplacement de joints peut être attribuable à l'affaissement de l'assise, à des conditions de chargement asymétriques, à une perte de support latéral due à des travaux de construction à proximité, à une insuffisance de dispositifs de retenue à l'emplacement des coudes et des tés, à des erreurs de construction initiale ou à des secousses sismiques.

vii) **Ouverture des joints**

On parle d'ouverture des joints lorsque deux tronçons adjacents de conduite sont dissociés dans le sens de la longueur et laissent voir un jeu.

viii) **Domage superficiel**

Les dommages superficiels sont des dommages causés à la surface interne de la conduite par des attaques chimiques, des attaques biologiques ou l'usure. Dans les conduites en béton, les dommages superficiels comprennent l'écaillage du matériau ainsi que la dénudation et la corrosion des armatures. Dans les conduites métalliques, ces dommages sont surtout dus à la corrosion. Dans les conduites revêtues ou gainées, les dommages qui touchent le revêtement ou la gaine sont considérés comme des dommages superficiels.

IX) **Affaissement**

Un affaissement est un tassement localisé de la conduite. Il peut provenir d'un tassement différentiel de l'assise, du lessivage des matériaux d'assise ou d'une erreur de mise en place au moment de la construction.

1.2.3 **Détérioration hydraulique**

La défaillance hydraulique se définit par l'incapacité de l'égout à transporter le débit de conception sans dommages à la propriété. Elle se manifeste par des inondations, des refoulements, des fuites excessives, des blocages, et des instabilités hydrauliques. Selon le WRc (1986), cette défaillance peut être traduite en termes simples par une diminution du rayon hydraulique et une augmentation du coefficient de rugosité. Dans le manuel de référence PACP/MACP du NASSCO, les descripteurs contribuant à la détérioration hydraulique sont rangés en facteurs de construction et facteurs d'opération et entretien.

1.2.3.1 **Facteurs de construction**

L'alignement des conduites : le mauvais alignement des conduites ou le déplacement relatif des conduites adjacentes par rapport à la position prévue a une incidence sur l'aire de la section transversale de la conduite se trouvant en amont, ceci a pour conséquence de perturber l'écoulement dans le tronçon.

Raccordements pénétrants : ce sont des branchements qui font saillie dans la conduite, obstruant ainsi partiellement la section transversale. Ils peuvent de ce fait entraver l'écoulement et causer des surcharges. Ce type des raccordements constitue une source de venue d'eau ou d'infiltration, ce qui donne lieu à un lessivage du sol conduisant parfois à une perte de support. Son niveau de gravité est évalué par une diminution du diamètre de la conduite.

Intrusion des produits d'étanchéité : tout ou partie du matériau utilisé pour rendre étanche un assemblage entre deux conduites adjacentes fait saillie dans la canalisation.

1.2.3.2 Facteurs d'opération et d'entretien

Infiltration de l'eau de la nappe phréatique : elle se produit à travers un joint défectueux lorsque le niveau de la nappe phréatique est plus élevé que celui du radier de la conduite. Les infiltrations sont bien souvent à l'origine des dépôts des minéraux qui se forment sur la paroi des conduites.

Obstacle : bien souvent la présence d'objets de tout genre dans la canalisation obstrue la section transversale avec un effet sur le régime d'écoulement.

Intrusion racinaire : les racines finissent par envahir les canalisations en trouvant une brèche à travers les défauts structuraux comme les fissures, les cassures, les joints ouverts et les trous. Leur développement conduit non seulement à l'apparition d'autres défauts structuraux mais aussi génère des blocages qui aboutissent à des surcharges, le diamètre de la conduite se retrouve réduit et l'écoulement perturbé.

Dépôt de sédiments : les sédiments sont constitués des dépôts de silt, de graisse et d'autres substances susceptibles d'entraver l'écoulement. Ils ont un impact sur la rugosité du matériau, de ce fait augmente le coefficient de Manning de la canalisation.

CHAPITRE 2 ORGANISATION GÉNÉRALE DU DOCUMENT

Afin d'atteindre les objectifs énumérés ci haut, le travail a été réalisé sur le réseau d'égout de la municipalité de Verdun (Montréal) et la ville de St Hyacinthe au Québec. La méthodologie, les résultats et la conclusion sont présentés sous forme d'article de revue au chapitre suivant. L'article est divisé en trois grands chapitres qui traitent successivement de :

- La problématique, du cadre théorique, de la revue critique de littérature ainsi que des objectifs.
- La 2^{ème} partie est axée essentiellement sur l'élaboration d'un modèle économétrique, le modèle logit ordonné. Les inspections télévisées reprises sur différents supports (DVD et VHS) fournis par les municipalités sont soigneusement étudiés afin de repérer les défauts susceptibles de provoquer un dysfonctionnement hydraulique pouvant se traduire ultimement en une perte de capacité si aucune mesure n'est prise. Le protocole du NASSCO/CERIU, actuellement adopté par plusieurs municipalités au Québec est appliqué à cette fin. Une discussion sur la significativité des paramètres obtenus ainsi que la pertinence des facteurs sélectionnés dans l'élaboration du modèle clos ce chapitre.
- La 3^{ème} partie présente une étude de cas sur les municipalités précitées et tourne sur l'établissement des courbes de détérioration des conduites. Ces dernières sont générées en appliquant les propriétés de la chaîne de Markov, laquelle dépend des matrices de transition obtenues à l'étape précédente. Ce chapitre propose également une correspondance à faire entre l'état de la conduite et le coefficient de Manning théorique à lui associé.
- La 4^{ème} partie reprend certains aspects méthodologiques devant permettre l'utilisation de la méthode sur un autre réseau.

Une discussion générale des résultats en rapport avec la revue critique de la littérature est faite à la fin du 3^{ème} chapitre. Cette discussion met en lumière les limites du modèle développé ainsi que les pistes à explorer afin d'arriver ultimement à un modèle prévisionnel plus élaboré. Une conclusion générale sur tout le travail est présentée à la fin du mémoire.

CHAPITRE 3 MODELING OF HISTORICAL DETERIORATION OF SEWER SYSTEM CONDUITS

Alain T. Lubini* and Musandji Fuamba**

Abstract

Sewer deterioration is of concern in most municipalities in Canada in such a way that the provincial government of Quebec is asking for a renewal of those facilities at a 1% rate in order to meet the goals of the national water plan elaborated in 2002. Under already challenging budget constraints, those municipalities cannot always afford the use of CCTV inspections to prepare their intervention. This paper describes a probabilistic model which is proposed to help assess the current conduit' operational and maintenance condition. Based on the multinomial logistic regression, the model shows the temporal deterioration of conduits for different types of materials. This model was successfully applied to a case study in Quebec. On average, it predicted correctly 54% of outcomes for transition probabilities involving both condition classes 1 (excellent) and 2 (good) while 59% were correctly predicted for condition class 3 (fair). It is suggested among other tools to assist sewer system managers in anticipating failures.

Key words: Sewers, condition grade, deterioration, logistic regression

* M.Sc. Civil engineering, École Polytechnique de Montréal

** Associate Professor, department of civil engineering, École Polytechnique de Montréal

3.1 Introduction

Most Canadian municipalities are experiencing sanitary and storm sewer network ageing and rapid deterioration. This problem is so crucial that Quebec's government implemented the national water plan which urges municipalities to attain a one percent replacement of their wastewater infrastructure assets by 2012. However, the knowledge of the current structural and hydraulic states of the network is necessary prior to any planning of replacement or rehabilitation works. Under already challenging budget constraints, water and sanitation managers, mainly use inspections by CCTV (Closed Circuit Television) when the pipes interior are beyond reach.

That technique provides historical information and illustrates the trend of deterioration in sewer pipes. Thus, the service level of underground infrastructures can be measured through the hydraulic performance which depends upon many interrelated factors: the pipe dimensions, the temporal effect of structural deterioration, intrusion, roots, corrosion, infiltration, etc. Those defects reduce the ability of the sewer to convey wastewater and runoff efficiently; therefore leading to local floods and combined sewer overflow during heavy rainfall episodes. For example, the Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC, 2004) reports that basement flooding related insurance claims in Canada are estimated to be of the order of \$140 million per year based on a multi-year average. This represents an average of approximately 30,000 to 40,000 incidents per year, with an average cost of damages per flooding incident between \$3,000 and \$5,000.

In order to limit the expenditures directly linked to emergency repairs of sewers, the use of an efficient model among other decision tools might help to anticipate pipe failures and malfunctioning. In this paper, the deterioration of operational and maintenance factors of combined sewers is being investigated sequentially to generate a model that can be used for specific material in the municipalities of Verdun and St- Hyacinthe, both located in the province of Quebec. The model is obtained by applying the ordered logistic regression, a powerful mean for calculating the transition probability matrices which constitute an important step in building the Markov deterioration model. The one-step transition probability for an infrastructure facility denotes the probability of transitioning from one state to a more deteriorated state over unit time. The model, related to some of the aforementioned factors, is designed in such a way that it shows the probabilistic fall in operational and maintenance conduit' conditions with respect to time.

This paper is organized as follows. A critical literature review dealing with existing deterioration modeling is presented in the first section. It is followed by our methodology which comprises all necessary steps in model elaboration; it also describes the NASSCO/CERIU rating system applied to the available data set. Next, we present a case study of an application of the designed methodology and finally end with a general discussion of the results and conclusion.

3.1.1 Literature review regarding hydraulic deterioration for the last decades

Sewer deterioration curves have been developed mostly for structural deterioration. The hydraulic performance degradation has so far received little attention. The developed structural deterioration curves are designed based on different techniques (deterministic, statistical, artificial intelligence oriented models, etc.).

Deterministic models

Deterministic models are mathematical models that are entirely determined through known relationships among states and events, without any room for variation. The challenging issue of determinism might be stated as such: does a condition state at time t determine its condition at time $t+1$? (Musy, 1998). Those models can be regrouped in 2 sub groups as illustrated by the following examples.

-Linear regression: from data collected in two Canadian municipalities, the multiple regression model was used recently to derive deterioration curves which were validated with 80% to 86% accuracy (Chungtai et al., 2008). Environmental, operational and physical parameters were considered in this model. The model appears disadvantageous because the deterioration process is expressed by a linear equation while the deterioration is essentially non linear and probabilistic (Morcous et al., 2002b).

-Exponential regression: this kind of model is generally calibrated by the least square method and its outcome is provided in the form of an exponential curve. The use of this model is illustrated in a simulation study showing the expected sewer failure over the next 20 years as a function of pipe age (Mailhot et al., 2000). The model is restrictive since it is built only on the age parameter without taking into consideration several other factors.

Artificial intelligence based models

Usually defined as the science of making computers do things that require intelligence when done by humans (Turing, 2010), artificial intelligence has been used to model the conduit deterioration. That approach is mainly applied in three different ways: case based reasoning (CBR), neural networks, genetic algorithms and fuzzy set theory.

-Fuzzy set theory: the fuzzy theory was designed to overcome the drawbacks of the classical set theory, especially in dealing with imprecise human language such as excellent, good, bad, etc. It accounts for various degrees of membership on the real continuous interval whereas in classical set theory, either an element belongs to a specific set or does not (binary logic). A fuzzy set describes the relationship between an uncertain quantity x and a membership function μ , which ranges between 0 and 1. The theory was first used to establish a deterioration model assessment and then later to derive deterioration curves (Kleiner et al., 2006; Bababi, 2007). One shortfall with fuzzy models is the subjectivity of the inference rules which are constructed based on the expert opinion (Tran, 2007).

-Neural networks (NN): this soft computing model is appropriate when the prediction should be done for a process which involves many predictors. NNs „learn’ the patterns of the underlying process from past data and generalize the gained „knowledge’ (or mathematical relationships between input and output data) to predict or classify an output given a new set of input variables from the problem domain (Hassoun, 1995). Even this modeling technique has the advantage of handling both scale and ordinal data types; they still have the following disadvantages: they need a lot of input data; they are tedious and time consuming (Leung et al., 2003).

Statistical models

Statistical models are described partially or entirely by probability equations. They are capable of simulating random processes. The Markov model is one of the most used in this category and numerous applications can be found in highway and bridges deterioration with different calibration techniques for predicting infrastructures expected conditions. Their success depends heavily on the computation techniques of the transition probabilities matrix. Up to the early 2000’s, the transition probabilities for wastewater systems were calculated by the expected value method, the frequency method and the Poisson method. The last two methods are slight

modifications of the first one. Application examples are illustrated by Wirahindikumah et al. (2001), Micevski et al. (2002) and Kleiner et al. (2001).

The observed advantages in applying those techniques are that: they can be applied to both types of data either regular or snapshot and they avoid erroneous results by following the regression line as is the case of the expected value method. Wan Ibrahim (1994) noted some disadvantages while applying the Markov model. First, the change in conditions between two inspections is not explicitly modeled. Secondly, the model is incapable of capturing the non stationary nature of the infrastructure transition matrix results then in small sample size within each segment of infrastructure. This limits the number of parameters to be estimated and therefore some probabilities in the transition matrix are arbitrarily set to zero. The Markov assumption of state independence is not realistic and the use of linear regression as deterioration modeling method is not appropriate because the dependent variable is discrete and ordinal in nature rather than continuous.

Wirahindikumah et al. (2001) suggested the use of econometric methods such as the ordered probit model and the ordered logit model to eliminate the disadvantages of using regression analysis when estimating the transition probabilities. Those models are able to capture the ordinal nature of the structural condition states and link the explanatory variables to the deterioration. The conduit deterioration appears to be a latent phenomenon such as the unobservable quantity for which, the econometric methods widely used in social science and biometrics fields are suitable. In addition, the deterioration modeling using econometric methods is capable of incorporating the data heterogeneity, due for instance to the subjectivity of data collection technique, and state dependence.

Based on the econometric method's advantages, the ordered logit model was chosen and applied in the present paper to estimate the conduit condition by using the CCTV inspections data and some pipe information. The assumptions and subsequent theory surrounding that technique are introduced in the next chapter.

3.1.2 Objective and methodology

The main objective of this paper is to generate operational and maintenance condition assessment models for combined sewer systems. Models adapted to the specific conduit materials can be used when predicting the conduit condition based upon pipe information such as age, diameter,

material and effluent type. In pursuing that objective, the CERIU/NASSCO protocol will be applied to collected data and a transition matrix will be set up for all condition states. Figure 1 summarizes all steps involved in the developed methodology.

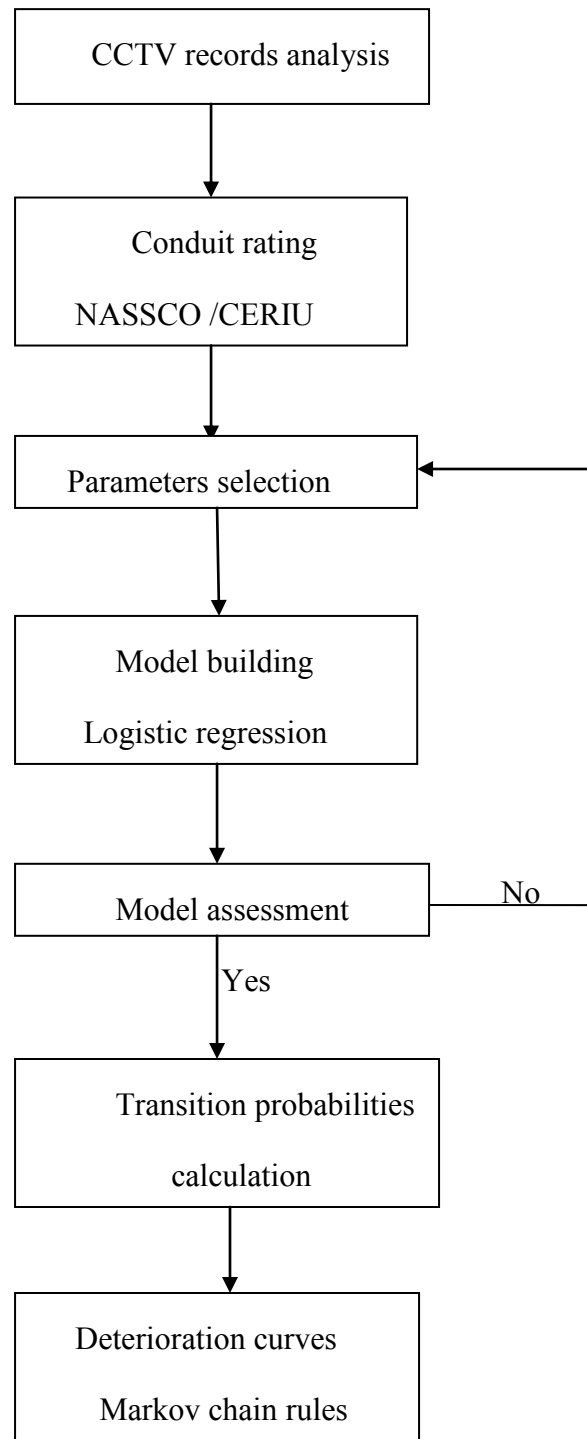


Figure 3.1 Methodology Steps

3.2 Developed hydraulic deterioration model

Closed circuit television records

Most cities in Canada use CCTV inspections for assessing the serviceability of their sewer network. This technique consists of recording the image of the interior of the sewer by a camera mounted on a tractor with forward, reverse, rotation and zoom capabilities. The records expose the operational and structural defects that are reviewed by qualified operators, in accordance with a specific coding system. Data obtained from CCTV inspection include: evidence of sediment, debris, roots, evidence of pipe sags and deflections, off-set joints, pipe cracks, leaks, location and condition of service connections, etc.

CERIU/NASSCO protocol

NASSCO's PACP is a system that provides standardization and consistency in the way sewer pipes are evaluated, coded and managed. Recognized as the industry standard in North America since 2001, Pipeline Assessment Certification Program (PACP) creates a comprehensive and reliable reservoir of data to describe the sewer pipe that can be used in prioritization, planning, and renovation of the wastewater collection system. To avoid discrepancies, in the way sewer systems were evaluated and inspected in Quebec, the *Centre de Recherche en Infrastructure Urbaine* (CERIU) adopted the NASSCO protocol for mains, laterals and manholes. This protocol was largely inspired by WRc (Water research council) and consists of coding operational and maintenance defects on one side and structural defects on the other side. The general assignment of pipe condition rating (grade) is defined as follows: Grade1-Excellent (pipe functional with minor defects); Grade2-Good (defects that have not started deteriorating); Grade3-Fair (moderate defects that will continue to deteriorate); Grade4-Poor (severe defects that will become grade 5 within the near future); Grade 5-immediate attention (defects requiring immediate attention). Then, the obtained scores can be used later in the statistical modeling.

Logistic regression

Logistic regression has been used extensively in bio assay, especially in dealing with dose response tests. In those cases, the dependent variable is a dichotomy, which means it can take only two classes, and the independent variables are of any type. That approach aims to predict the outcome of an event by providing the likelihood of success and failure. An application of binary logistic regression for sewer deterioration modeling can be found in Koo et al. 2006.

In this paper, the ordinal logit model for multinomial responses approach is applied to estimate the transition probabilities of the sewer system. The developed model intends to establish the relationship between a polytomous response variable (condition grade) and a set of regressor variables (age, diameter, length, slope and material). Instead of considering the probability of an individual grade such as one of the binary logistic regressions, the probability of that grade and all grades ordered before are considered. The cumulative probabilities are defined as follows (Agresti, 2002):

$$P(Y \leq j|x) = \pi_1(x) + \dots + \pi_j(x), \quad j=1, \dots, J \quad [1]$$

Then

$$\text{Logit} [P(Y \leq j|x)] = \ln \frac{P(Y \leq j|x)}{1 - P(Y \leq j|x)} = \ln \frac{\pi_1(x) + \dots + \pi_j(x)}{\pi_j(x) + \dots + \pi_{j+1}(x)} \quad j=1, \dots, J-1 \quad [2]$$

A model that simultaneously uses all cumulative logits is

$$\text{Logit}(Y \leq j|x) = \alpha_j + \beta'x, \quad j=1 \dots J-1. \quad [3]$$

Consider a multinomial response variable Y with categorical outcomes, denoted by $1 \dots J$ and let X_i denote a p -dimensional vector of explanatory variables or covariates. The dependence of the cumulative probabilities of Y on X 's for the proportional odds model is often of the form expressed in equation [4]

$$\ln \frac{P(Y \leq j | x)}{P(Y > j | x)} = \alpha_j + \mathbf{x}'\beta \quad j=1, \dots, J-1. \quad [4]$$

It can be expressed in the form

$$\ln \frac{\pi_1(x) + \dots + \pi_j(x)}{\pi_j(x) + \dots + \pi_{j+1}(x)} = \alpha_j + \mathbf{x}'\beta \quad j=1, \dots, J-1 \quad [5]$$

Each cumulative logit has its own intercept. The $\{\alpha_j\}$ are increasing in j , since $P(Y \leq j | x)$ increases in

j for fixed x , and the logit is an increasing function of this probability and each cumulative logit uses all J response categories.

Hence, for $J=4$, the model [4] consists of three simultaneously cumulative link-functions for solving the model parameters in the following equations:

$$\ln \frac{\pi_{i1}}{\pi_{i2} + \pi_{i3} + \pi_{i4}} = \alpha_j + \beta'x \quad \text{for } j = 1 \quad [6]$$

$$\ln \frac{\pi_{i1} + \pi_{i2}}{\pi_{i3} + \pi_{i4}} = \alpha_j + \beta'x \quad \text{for } j = 2 \quad [7]$$

$$\ln \frac{\pi_{i1} + \pi_{i2} + \pi_{i3}}{\pi_{i4}} = \alpha_j + \beta'x \quad \text{for } j = 3 \quad [8]$$

Where α_j are the intercept parameters,

$\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p)'$ is a vector of coefficients

X = the explanatory variables.

This model can be interpreted in terms of a latent variable. In fact, the deterioration process of the sanitary system that translates in a drop of performance is not measurable. Instead, depending on the quality of the CCTV records, internal pipe distresses can be observed. For example, root invasion inside a conduit is an indicator of a deteriorating infrastructure. The magnitude of this invasion might be estimated. It provides an insight about the management steps to be taken into account. In general, the infrastructure degradation process can be assumed continuous and therefore it can be expressed by the underlying continuous random variable. The ordered probit

and ordered logit models are designed in such a way that they account for the latent nature of the deterioration process which the ordinary least square (OLS) does not.

Suppose that z_i is an unobserved and continuous variable, we only observe the discretized version of z_i in the form of y_i , where $y_i = j$ is observed if

$$\theta_{j-1} < z_i \leq \theta_j$$

Further suppose that $z_i - \beta'x_i$ has distribution F then:

$$P(Y \leq j) = P(z_i \leq \alpha_j) = P(z_i - \beta'x_i \leq \theta_j - \beta'x_i) = F(\theta_j - \beta'x) \quad [9]$$

If F follows the logistic distribution, where $F = e^x / (1 + e^x)$, then

$$\pi_{ij} = \frac{\exp(\theta_j - \beta'x)}{1 + \exp(\theta_j - \beta'x)} \quad [10]$$

The maximum Likelihood procedure is used to estimate the value of the parameter vector β and thresholds $\theta_1 \dots \theta_{j+1}$ simultaneously.

The likelihood function is given in the form:

$$\prod [\prod \pi_j(x_i)^{y_{ij}}] = \prod \left[\prod \left(\frac{\exp(\theta_j + \beta'x)}{1 + \exp(\theta_j + \beta'x)} - \frac{\exp(\theta_{j+1} + \beta'x)}{1 + \exp(\theta_{j+1} + \beta'x)} \right)^{y_{ij}} \right] \quad [11]$$

Based on the parameters estimated by the use of equation [11], the transition probabilities for each conduit segment can be obtained. The transition probabilities represent the likelihood that a given segment conduit has either to remain in the current condition or to move to the next condition state. As the wastewater deterioration process involves 4 classes (class 5 meaning that the conduit has collapsed already is not encountered in the field), the computation is done for three incremental degradation models. Condition state 1 will require four increments: 1→1; 1→2; 1→3 and 1→4 assuming that the deterioration is not reversible and nothing is done to improve the overall conduit state conditions. The probabilities are obtained in the following manner:

$$P(Y_{ik} = 1 | X_{k,i}) = F(\theta_{i1} - \beta x)$$

$$P(Y_{ik} = 2 | X_{k,i}) = F(\theta_{i2} - \beta x) - F(\theta_{i1} - \beta x) \quad (12)$$

$$P(Y_{ik} = 3 | X_{k,i}) = F(\theta_{i3} - \beta x) - F(\theta_{i2} - \beta x)$$

$$P(Y_{ik} = 4 | X_{k,i}) = 1 - F(\theta_{i3} - \beta x)$$

With $P(Y_{ik} = i | X_{k,i})$ being the transition probability from condition state s_i to state s_j for a given conduit.

The transition probabilities also called transition probability matrix are expressed in $n \times n$ matrix form presented herein. This can be used in the Markov chain (see next paragraph):

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad [13]$$

The Markov chain theory

The Markov chain is one of the modeling methods that have been considerably used in predicting infrastructure (bridges and sewer system) deterioration. For a set of states, $S = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_t\}$, the deterioration process starts in one of these states and moves successively from one state to another until it reaches the state whereby a further deterioration is no longer possible. If the chain is currently in state s_i , it then moves to state s_j , at the next step with a probability denoted by p_{ij} . The Markovian property establishes that, for the conditional distribution of any future s_{t+1} , given the past states s_1, s_2, \dots and the current state s_t , subject is independent of the previous states and depends only on the present state (Ross, 1996). This translates to the following expression:

$$P\{s_{t+1} = j | s_t = i, s_{t-1} = i_{t-1} \dots s_2 = i_2, s_1 = i_1\} = P\{s_{t+1} = j | s_t = i\} = p_{ij} \quad [14]$$

The probabilities p_{ij} are called the transition probabilities and are therefore nonnegative. The process can remain in the same state, and this occurs with probability p_{ii} .

Then

$$P_{ij} \geq 0, \sum_j P_{ij} = 1, \quad i=1,2,\dots \quad [15]$$

If the value of the initial state or the present state is known, we can obtain the future state value by multiplying the present or initial state vector with the transition matrix. At any time t , the value S_t is computed by multiplying the initial vector S_0 with the t_{th} power of the transition matrix P . Thus:

$$S_t = S_0 P^t \quad [16]$$

With S_t representing the condition state vector at time T . The conduit estimated condition rating at any age is obtained by multiplying the condition state vector to a vector of condition ratings.

$$C_t = S_t R' \quad [17]$$

Where C_t = the estimated condition rating at time t ,

S_t = condition state vector at time t

R' = transpose of the condition rating vector R

In the deterioration modeling, the initial state and the rating vector are often known, only transition matrix P in equation [16] has to be determined in order to get the expected condition of the system in the future.

3.3 Case study: application of the logistic regression approach for Verdun and Saint Hyacinthe data sets

3.3.1 Data source

The available data for this study are the CCTV records from inspections conducted during the period spanning from 1995 and 2006 in Verdun and from 1998 to 2007 in St-Hyacinthe. Our sample comprises conduits made of different material such as brick, concrete, reinforced concrete, asbestos-cement (CA), PVC and sandstone. The later is the most commonly used material (37%) in the sample while brick, CA and PVC are under-represented (only 5%) and grouped in one set for the sake of analysis. Most of the sewers in both municipalities were built in the first half of the 20th century with the average age being 63 years. In total 459 conduits of combined sewers system were considered. The defects that affect the hydraulic performance thus

changing the internal pipe's Manning coefficient (sediment deposition, root intrusion, infiltration, corrosion, cracks, etc) were used as targets for the overall pipe rating. The application of NASSCO's PACP quick rating protocol led to the conduits classification with only 0.01% belonging to class 1; 15%; 53% and 31% respectively for classes 2, 3 and 4.

3.3.2 Model application

Collected data from both municipalities were used for the application of the logistic regression approach since both entities are mostly residential with similar soil type and weather pattern. The factors involved in the developed deterioration model are given in table 3.1.

Table 3.1 Variables description Tableau 3.1

Variables	Description
Age	The conduit age is obtained by subtracting the installation or rehabilitation year from the inspection year. Continuous variable
Diameter	Nominal value of conduit diameter in m . Continuous variable
Length	The length of a pipe segment between 2 manholes in m . Continuous variable
Slope	The pipe segment's slope in percentage: (upstream invert elevation - downstream invert elevation)/length. Continuous variable
Material	Concrete, reinforced concrete, brick, cement, sandstone, and PVC. Dummy variable.

The following estimation model was built for each material and deterioration stage:

$$Y^* = \alpha_0 + \beta_1 \text{age} + \beta_2 \text{diameter} + \beta_3 \text{length} + \beta_4 \text{slope} + \beta_5 \text{material} + \varepsilon \quad [18]$$

Where Y^* is the unobservable conduit condition

and α_0 is the threshold, $\beta_1 \dots \beta_5$ regressor coefficients.

3.3.3 Results and discussion

Using the statistical tool JMP 8 (Sall, 2008) with the given data, the estimation model was run to find the optimum solution. Eight iterations were needed to reach the optimal solution for class 1 whilst 7 iterations were enough for classes 2 and 3. The parameter estimate values, β and α (intercept) are shown in table 3. 2. The β 's are the same for all condition classes whereas the α 's depend on the considered condition.

Tableau 3.2 Estimation result for ordered logit model

Terms	Classe1		Classe2		Classe3	
	Estimate	Prob>ChiSq	Estimate	Prob>ChiSq	Estimate	Prob>ChiSq
Intercept1	-0.994	0.1575	3.651	<.0001*	6.486	<.0001*
Intercept2	3.640	<.0001*	7.272	<.0001*	-	-
Intercept3	7.258	<.0001*	-	-	-	-
Age	-0.097	<.0001*	-0.097	<.0001*	-0.087	<.0001*
Diameter	0.753	0.0386*	0.629	0.0898	-0.053	0.9276
Concrete	-0.358	0.0475*	-0.348	0.0552	-0.429	0.0453*
Bri-Ce-PVC	0.231	0.4203	0.223	0.4511	0.459	0.2851
Sandstone	0.262	0.1669	0.251	0.1868	0.031	0.8908
Length	-0.004	0.1791	-0.004	0.2242	0.002	0.5389
Slope	0.051	0.7079	0.057	0.678	0.107	0.4893

3.3.3.1 Model assessment

To assess the model, the overall model test was conducted and the strength of association measured. Results are discussed hereafter.

(a) Overall model test

An overall test of the null hypothesis was done before scrutinizing of each calculated coefficients in the regression (equation 16). The null hypothesis test states that all of the predictor effects are zero. The test was based on the change in $-2\log$ -likelihood and has a chi-square distribution.

From table 3.3, one can see that the difference between both log-likelihoods has a significance level less than 0.0005. This means that the null hypothesis can be rejected and therefore the model with predictors is better than the one without.

Tableau 3.3 Log –likelihood test

Classes	Model	-Log-likelihood	Khi carré	Prob.>Khi carré	ρ^2
Classe 1	Difference	98,36636	196,7327	<,0001*	0,21
	Complete	367,05032			
	Reduced	465,41668			
Classe2	Difference	91,87948	183,759	<,0001*	0,21
	Complete	355,46227			
	Reduced	447,34176			
Classe3	Difference	23,86032	47,72064	<,0001*	0,09
	Complete	231,58299			
	Reduced	255,44331			

(a) Measuring strength of association

There are several R^2 - like statistics that can be used to measure the strength of the association between the dependent and the predictor variables. The likelihood ratio index, ρ^2 , defined by Mcfadden was used here. It might be interpreted as the percent increase of the log likelihood function above the value estimated when all parameters are set to zero.

$$\rho^2 = 1 - L(B)/L(0)$$

Where ρ^2 is the likelihood ratio index

$L(B)$ is the log- likelihood function for the model with the estimated parameters and

$L(0)$ the log- likelihood when all the parameters are set to zero

Although a larger value of the index could suggest a better fit of the model, this statistic among others similar is not as useful as the regression's R^2 statistic since its interpretation is not straightforward (Norusis, 2010). In addition there is no clear rule specifying how large the index should be to qualify as a good fit (Train, 1986). The result shown in table 2 are the same for condition states 1 and 2 ($\rho^2 = 0.21$), whereas the index drops at 0.09 for condition state 3. This discrepancy might be attributed to the size of the data used in the modeling phase. In fact for the latter condition, only 280 conduits were used for simulation while 458 and 455 conduits were used respectively for conditions 1 and 2.

The percentage of outcomes correctly predicted can be used as an additional statistic to demonstrate the goodness of fit of the designed model.

Table 3.4 shows an average of about 54% correctly predicted for classes 1 and 2 whereas 59% were reasonably well predicted for condition class 3. 79% of $1 \rightarrow 3$, $2 \rightarrow 3$ and $3 \rightarrow 3$ transitions are consistently predicted. This result is probably justified by the data size.

Tableau 3.4 Percentage correctly predicted

	Percentage correctly predicted				
Classes	1	2	3	4	Average
1	NA	45.58	79.83	35.416	53.61
2	NA	45.58	79.01	37.5	54.03
3	NA	NA	78	40	59

3.3.3.2 Parameters significance

The overall model test as confirmed by the Wald test for parameters significance showed that some parameters were more sensitive than others as shown in table 4.

Tableau 3.5 Wald test

Source	Classe1		Classe2		Classe3	
	Wald Chi-square	Prob>ChiSq	Wald Chi-square	Prob>ChiSq	Wald ChiSquare	Prob>ChiSq
Age	101.472	<.0001*	94.255	<.0001*	21.152	<.0001*
Diameter	4.277	0.0386*	2.879	0.0898	0.008	0.9276
Material	7.245	0.0645	6.688	0.0825	4.589	0.2045
Length	1.805	0.1791	1.477	0.2242	0.378	0.5389
Slope	0.140	0.7079	0.172	0.678	0.478	0.4893

Parameters such as age, diameter and material are significant at different confidence levels. For class 1 (optimization obtained with 458 conduits), the age and the diameter were found to be

significant with 95% confidence level while material was significant with 90% . Slope and length are not significant at all with respect to the least significance level set, $p < 0.1$. On one hand, the age is the sole predictor to remain significant at 95% regardless of the deterioration class considered. On the other hand, predictor diameter and material are significant at 90% for class 2 and are any longer significant for class 3. Therefore the models were only built with significant parameters (age, diameter and material):

$$\mathbf{Y^*(1)=\alpha_1 - 0.1\,age+0.75diameter+\beta_3\,material} \quad [20]$$

With $Y^* (1)$ = condition state 1

$$\begin{aligned} \beta_3 &= -0.358 \text{ for concrete} \\ &= 0 \text{ for reinforced concrete} \\ &= 0.26 \text{ for sandstone} \end{aligned}$$

$$\mathbf{Y^*(2)=\alpha_2 - 0.1\,age+0.63diameter+\beta_3\,material} \quad [21]$$

With $Y^* (2)$ = condition state 2

$$\begin{aligned} \beta_3 &= -0.35 \text{ for concrete} \\ &= 0 \text{ for reinforced concrete} \\ &= 0.25 \text{ for sandstone} \end{aligned}$$

$$\mathbf{Y^*(3)=\alpha_3 - 0.1\,age -0.05diameter+\beta_3\,material} \quad [22]$$

With $Y^* (3)$ = condition state 3

$$\begin{aligned} \beta_3 &= -0.43 \text{ for concrete} \\ &= 0 \text{ for reinforced concrete} \\ &= 0.3 \text{ for sandstone} \end{aligned}$$

Those equations can therefore be used to generate the transition probabilities matrices which are necessary in determining a conduit condition at any time as established by the Markov chain rules. An application example is worked out in the next section.

3.3.4 Estimation of transition probabilities

The transition probability plots are drawn by varying the age number with the corresponding probability equation (20, 21 and 22) as illustrated in figure 3.2. It can be observed that a new concrete pipe has a 70% probability of remaining at condition state 1 after a year of service. After 10 years of service, that probability drops to 44% which represents the likelihood of moving to state 2. At age 15, the probability of being in good condition (i.e. 2) is greater than any other probability: 0.36 for condition 1; 0.11 for condition 3 and 0 for condition 4. That pattern is maintained throughout the pipe service life for all kinds of material. As the age increases, the probability of occurrence of condition excellent decreases while the probability of being at poor condition increases.

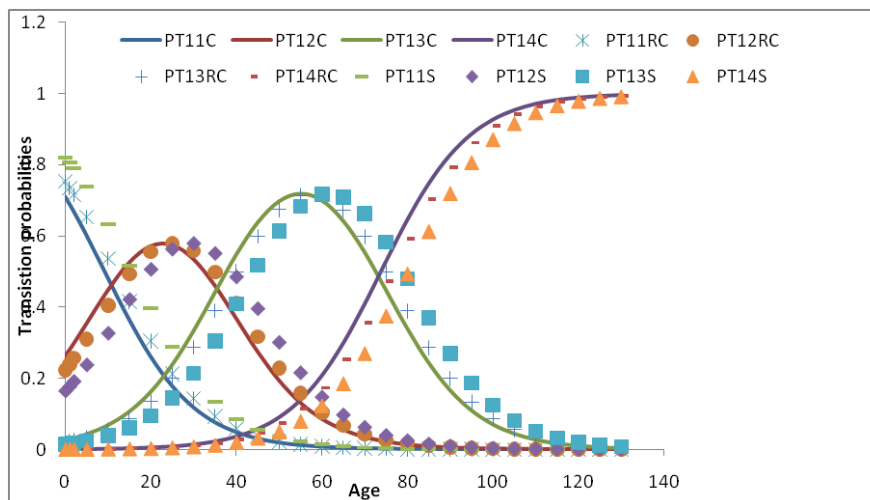


Figure 3.2 Transition probabilities-condition state 1

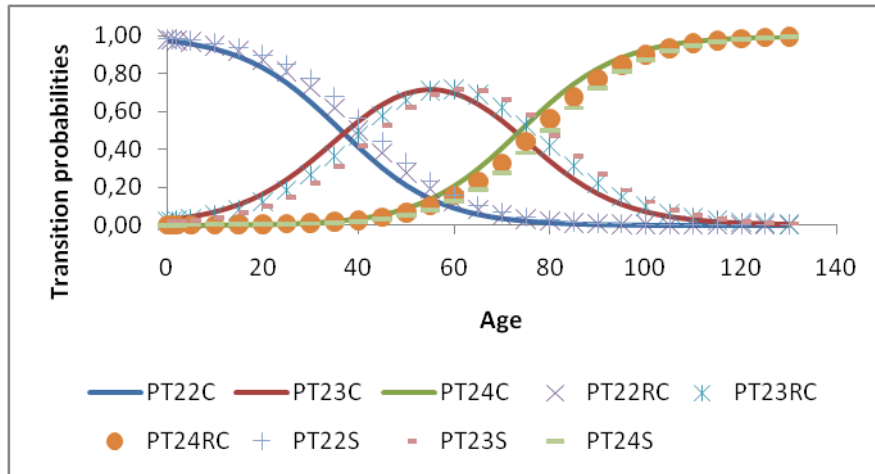


Figure 3.3 Transition probabilities-condition state 2

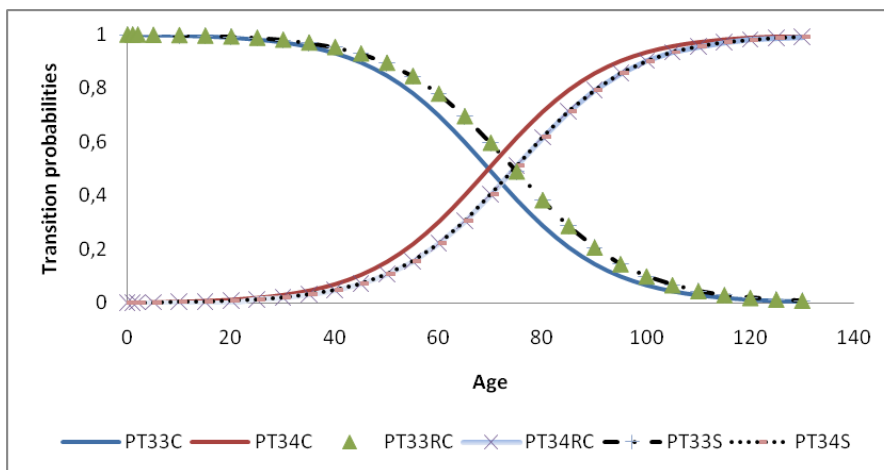


Figure 3.4 Transition probabilities-condition state 3

(a) Age

Age plays a significant role in the wastewater deterioration process as shown in table 1. Take for example root intrusion that takes place through a hole. With ageing the root keeps on growing which causes an increase in pipe roughness. According Moody's diagram, this increase in relative roughness will cause an increase of the friction factor as well. This finally implies an operational and maintenance deterioration that can translate eventually in hydraulic performance drops. For all types of material (concrete, reinforced concrete and sandstone), between 10 and 20

years old, the likelihood of a drop from condition 1 to 2 increases by about 15% on average, while for a 60 to 70 years old segment, the odds a drop from condition 3 to 4, increases by 19%. This suggests that the rate of deterioration increases with age even if old pipes are not always in bad shape. This finding confirms what is already known and applied in the management strategy. Old segments and those at potential risk of collapse are the starting point of any rehabilitation program.

(a) Diameter

The model showed that the diameter is a significant parameter when it comes to transitions from classes 1→2, 1→3, and 1→4. It does not play any role at all from class 2 to higher classes. Segments with small diameters are more likely to experience a hydraulic performance drop than large diameters when obstacles are present in the conduit. In fact, large diameters can still convey wastewater due to their hydraulic radius while small diameters may face deposit and other obstacles. Meanwhile, May (1993) reported that the potential for hydrogen sulfur emission in small conduits (less than 600mm, which represent 74% of data) is high. This potential is exacerbated by the effluent's nature (pH), high temperature and slower flow. The transition probabilities obtained for concrete showed that for a 380 mm diameter conduit, the likelihood of moving to state 3 after 50 years of service is 70% while it is about 67% for a 650 mm diameter.

(b) Material

From table 3.2, one can see that concrete, (as opposed to brick, CA, PVC, sandstone) is a significant factor in the elaborated deterioration model for classes 1 and 2. Overall, it remains non significant for the model. Reinforced concrete was used as a reference in setting up the dummy variables. It turned out to be a more deterioration resistant material than any other used in this study. This is expected because the reinforcing steel makes the conduit strong enough to prevent the structural deterioration which leads to a hydraulic dysfunction. A close look at figure 3.2 reveals that the likelihood of being in state 1 after a year of service for a reinforced concrete pipe is 80% while it is 70% for a concrete pipe. The impact of other material in the degradation processes is not assessed well enough due to a lack of data. However, they constitute less than 1% of the final sample. The findings of this study in terms of material impact are in line with the conclusion drawn by Micesvic and contradict Baik (2006). The later found that the material is not pertinent in the deterioration process.

3.3.5 Deterioration curve

The Markov properties discussed before and the transition probability matrix computed in the previous section are pieced together to design the deterioration curve. This curve shows the relationship between condition grade and the age. Given the transition matrix of a 380 mm concrete pipe calculated as:

$M = [0.71 \ 0.26 \ 0.03 \ 0; 0 \ 0.97 \ 0.03 \ 0; 0 \ 0 \ 0.997 \ 0.003; 0 \ 0 \ 0 \ 1]$ and the rating vector

$R = [1 \ 2 \ 3 \ 4]$, equation 16 leads to figure 5.

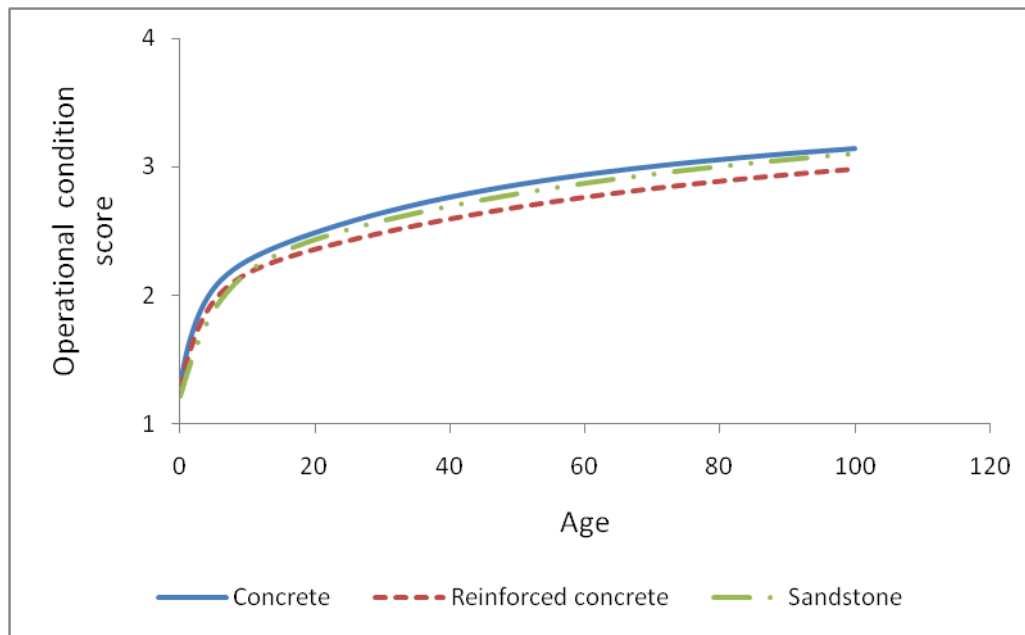


Figure 3.5 Operational condition grade vs. age

It can be observed here that after up to 80 years of service, pipes are still in condition class 3 which is good enough. This is not unusual since in both municipalities (Verdun and Saint Hyacinthe) most of the conduit segments, even though their average age is about 65, are nevertheless able to carry the design flow without major hydraulic problems. Unlike the last service years, which show a similar pattern with the curves drawn by Chughtai (2008), the deterioration slope is noticeably steep for the first 10 years. The reasons behind this outline might be the fact that the drop in operational condition rating is due on one hand to the progressive hydraulic radius reduction and on the other hand to the increase in surface frictional resistance. The first reason follows a continuous pattern with respect to the age while the latter does not. Carrier (1986) mentioned that encrustation is visible at early age with the buildup of

pustules or tubercules whose proliferation gradually leads to vortex agitation. Once the encrustation forms a continuous layer within the conduit, the discrepancy throughout the protruding enlargement tends either to remain constant or changes at a slower pace than before. As stated earlier, the material impact on deterioration seems minor or inexistent. The shape of the curves is the same for all three materials with the reinforced concrete pipe providing the best resistance to condition drop.

Mainly, hydraulic dysfunction can translate in to surface erosion, pollution of receiving water bodies, local floods, and in general the situation gets worse with ageing. The modeling of the Verdun network with PCSWMM showed some concerns with respect to the hydraulic capacity for some conduit segments built in 1923. In fact, their ability to carry the design discharge is significantly reduced in such a fashion that the 5 year return period at actual conditions ends up causing overloads whose magnitude is provided in table 3.6. The available height under manhole floor level was 0, meaning that the water rose up to the floor. Those conduits were given an overall class 3 condition state according to NASSCO protocol prior to the modeling. The possible explanation behind that failure might therefore be the presence of defects revealed by inspection records. Pollert et al. (2006) documented an empirical research demonstrating the marked relationship between hydraulic effects and the failures due to temporal condition decline of sewer systems. They were able to convert the local head loss coefficient between two sections to Manning's roughness coefficient.

Tableau 3.6 Insufficient hydraulic capacity for the 5 year return period, Chicago storm

Street	Manhole	Age	Class	Available Height *	Hydr. dysf duration** (min)	Overflowing duration (min)
Claude	193	73	3	0.00	21.10	0.10
Willibrord	10	73	3	0.00	24.8	0.20
Willibrord	11	73	3	0.00	24.6	0.30
Willibrord	12	73	3	0.00	22.1	0.10

*Available height under floor level

** Hydraulic dysfunction

Tableau 3.7 Theoretical Manning coefficient

Manning coefficient "n"	Operational and maintenance conditions
0,013 - 0,015	1
0,016 - 0,017	2
0,017 - 0,019	3
0,019 - 0,020	4

Considering a 380mm concrete conduit whose operational and maintenance condition grade and deterioration curve have been established above, figure 3.6 shows how the Manning coefficient may vary with respect to operational condition grade.

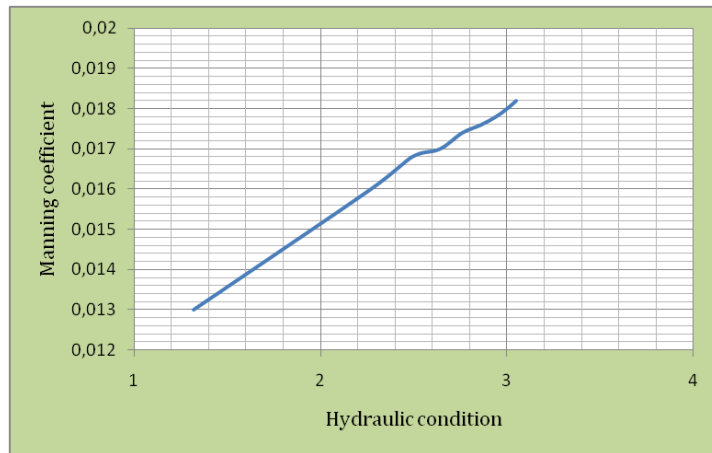


Figure 3.6 Manning coefficient Vs operational grade

3.4 Conclusion and recommendations

An operational and maintenance deterioration curve has been generated based on the ordered logistic model. This approach seems to be more realistic than other existing deterministic methods in accounting for the latent nature of deterioration process. The obtained results can be used among other tools in pro active manner in the sanitary sewer system management.

Preceding studies suggested that more than one observation is needed in order to build more efficient models. However, this precaution would not definitely solve the problem as long as deterioration process is both an untimely and random phenomenon. Moreover, the conduits are designed to be self cleaning, which means the observed defects at time t might not be observed at time $t+1$, following an extremely heavy rainstorm. Additional parameters like the frequency of interventions are therefore required as explanatory variables for improving this model.

Water quality parameters such as acidity, mineralization, concentration of organic matters and metals, etc should be included as well in the analysis. A larger data sample is also needed to refine the developed model.

CHAPITRE 4 ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES COMPLÉMENTAIRES

L'étude de cas telle que discutée au chapitre 3 a été réalisée sur les réseaux de Verdun et St Hyacinthe, la localisation ainsi que certains détails importants de ces deux réseaux sont fournis dans les lignes qui suivent.

4.1 Description des sites

4.1.1 Saint Hyacinthe

La ville de St Hyacinthe est située dans la municipalité régionale de comté des Maskoutains en Montérégie au Québec. Ses coordonnées géographiques sont:

45° 37'10''Nord et 72° 57'30'' Ouest (figure 4.1). Située en périphérie de la ville de Montréal, elle est la principale zone de production agricole du Québec.



Figure 4.1 Localisation de la ville de Saint Hyacinthe

En annexe 3, on peut voir le plan du réseau du bassin Douville qui forme avec le bassin Pratte le réseau la ville de St Hyacinthe.

Le réseau d'assainissement urbain est relativement jeune, soit 40 ans en moyenne, et se compose en majorité d'égouts unitaires. Le réseau séparatif est d'installation récente comme dans la plupart des municipalités du pays.

Les rapports d'inspections CCTV disponibles pour ce travail ont fait l'objet d'analyse et d'application du protocole de NASSCO/CERIU. Les caractéristiques des conduites retenues dans l'échantillon d'analyse sont reprises dans la figure 4.2. Avec 68%, le béton armé est le matériau le plus rencontré dans les inspections réalisées à St hyacinthe. Le diamètre moyen des conduites inspectées est de 0.675 mètre alors que la pente moyenne est de 0.34%.

La topométrie générale du bassin est relativement plane. Les élévations du terrain naturel varient approximativement entre 32,0 mètres et 34,0 mètres.

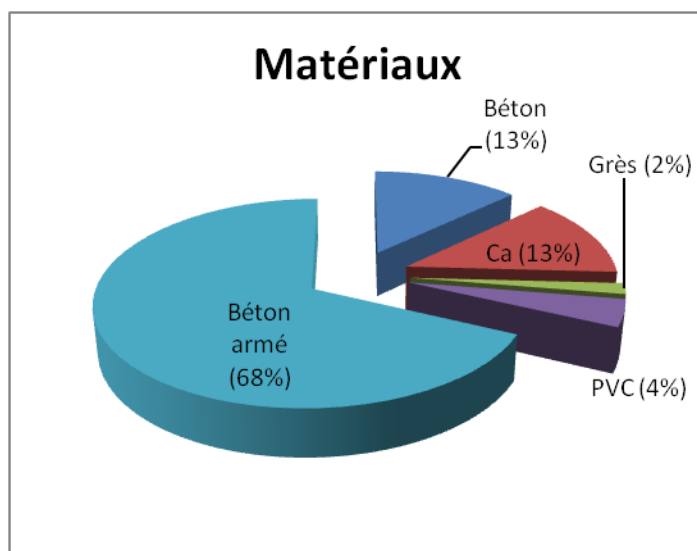


Figure 4.2 Répartition des matériaux utilisés

4.1.2 Verdun

Verdun est un arrondissement de la ville de Montréal situé au sud-ouest de l'île et à 5 km du centre ville. Il est délimité au nord par l'autoroute 15, au sud par l'arrondissement de Lasalle, à l'ouest par le canal de l'aqueduc et à l'est par le fleuve St Laurent. Deux de ses trois quartiers sont situés sur la terre ferme tandis que l'autre forme l'île des sœurs (figure 4.3).

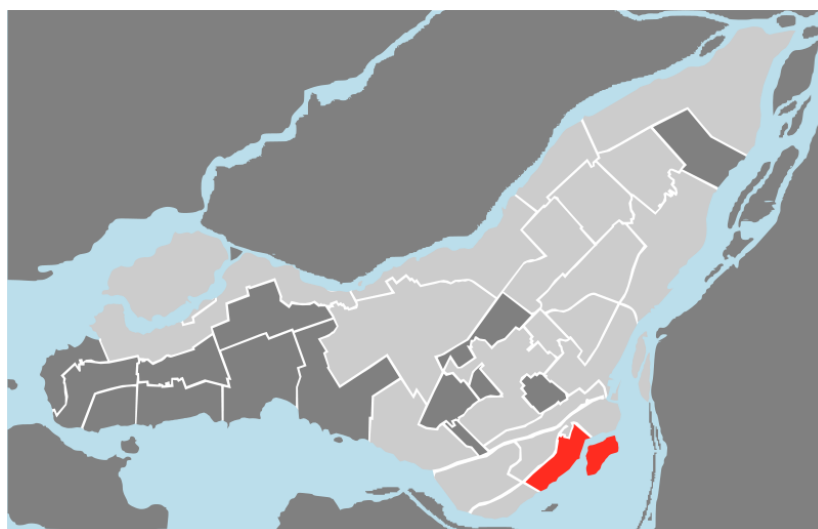


Figure 4.3 Localisation de la municipalité de Verdun dans la ville de Montréal

La municipalité de Verdun compte différents types de réseaux : combiné, sanitaire pluvial et pseudo séparatif. Ce dernier n'est pas si important dans le secteur comparativement aux autres. Le réseau pluvial est surtout présent à l'Ile des Sœurs.

Le réseau combiné compte le plus grand nombre de tronçons. Trois cent quarante deux conduites inspectées entre 1994 et 2008 ont été analysées dans le cadre de cette étude. Le réseau a été construit en 1923 et la moyenne d'âge des conduites utilisées est de 78 ans, la pente moyenne est de 0.72% avec un diamètre moyen de 0.450 m. Contrairement au réseau de St Hyacinthe, le matériau le plus rencontré est le grès (figure 4.4).

Le plan du réseau d'égout de Verdun est donné en annexe 3.

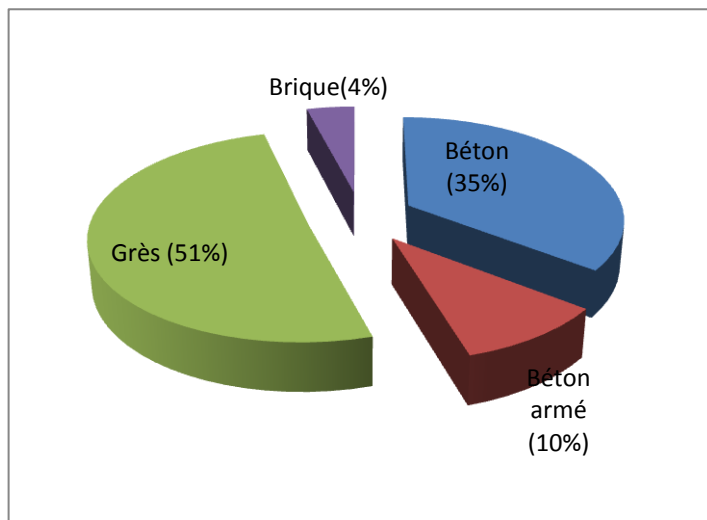


Figure 4.4 Matériau des conduites du réseau de Verdun

4.2 Application de la régression logistique

La méthodologie utilisée dans ce travail peut être reproduite sur un autre réseau en observant les étapes suivantes :

- Sélectionner un réseau (unitaire, domestique ou pluvial)
- Analyser les inspections CCTV
- Appliquer un protocole de codification permettant de donner un score à chacune des conduites inspectées (ex : WRc, NASSCO,...)
- Sélectionner des paramètres susceptibles d'expliquer le processus de détérioration des conduites (âge, diamètre, longueur, pente, matériau, ...)
- Préparer les fichiers input pour le logiciel de traitement statistique (fichier Excel comprenant des colonnes indiquant : le score individuel de chacune des conduites , âge , diamètre, longueur, pente, matériau...). Pour k condition (classe de dégradation), il faut k-1 fichiers . Le 1^{er} fichier comprend le maximum des conduites (toutes les classes : 1,2,3 et 4), le 2^{ème} est constitué des classes (2,3 et 4) et le 3^{ème} fichier comprend les classes 3 et 4.

- Faire une régression logistique au moyen d'un logiciel statistique approprié (JMP8, STATISTICA,..., voir figure 4.5.). Les coefficients β des différents facteurs du modèle sont obtenus automatiquement en maximisant la fonction de vraisemblance (équation 11).

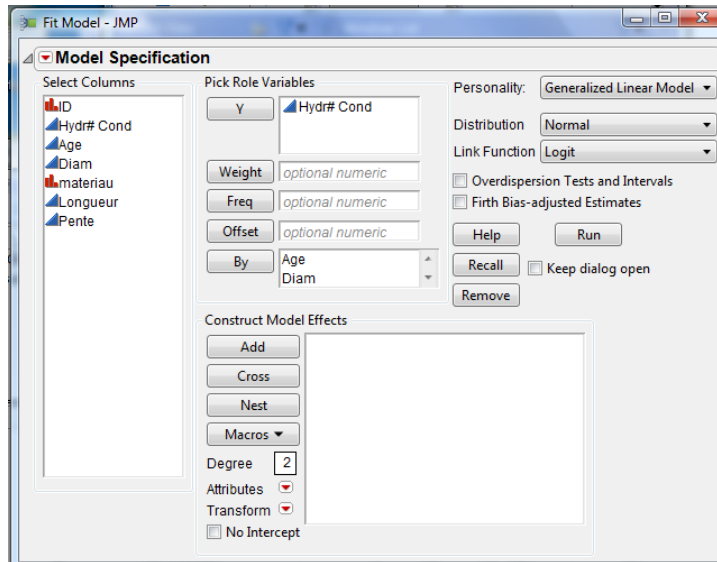


Figure 4.5 Ecran de specification de modèle (JMP 8)

- Pour chaque fichier constitué et traité, on obtient une équation de la forme :

$$Y^* = \alpha_0 + \beta_1 age + \beta_2 diameter + \beta_3 length + \beta_4 slope + \beta_5 material + \epsilon$$

Les équations du modèle sont présentées dans les figures 4.6.; 4.7 et 4.8.
- Déterminer la significativité des paramètres utilisés c-à-d vérifier si le coefficient s'écarte significativement de 0 et de la probabilité critique du test. Pour le présent travail, elle est fixée à $p > 0.1$.
- Retenir les paramètres (variables indépendantes) significatifs et éliminer ceux qui ne le sont pas.

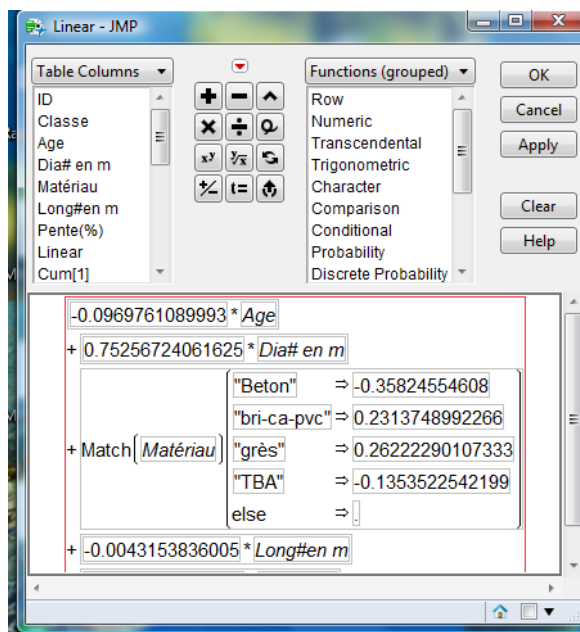


Figure 4.6 Modèle de régression pour la classe 1

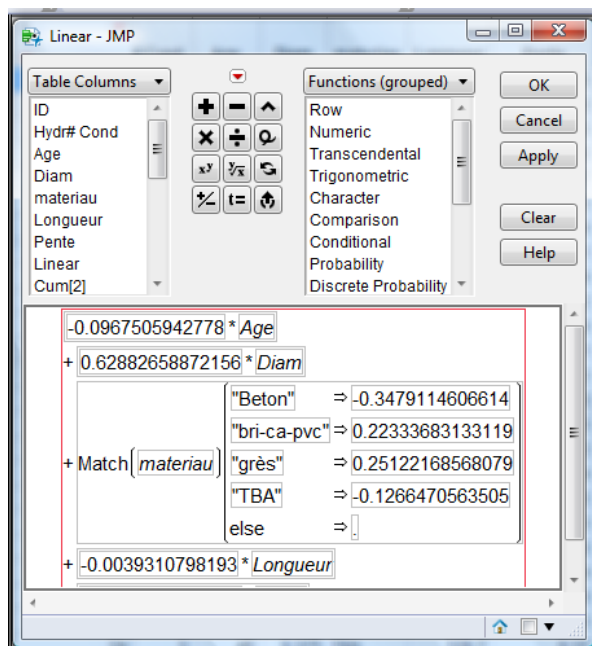


Figure 4.7 Modèle de régression pour la classe 2

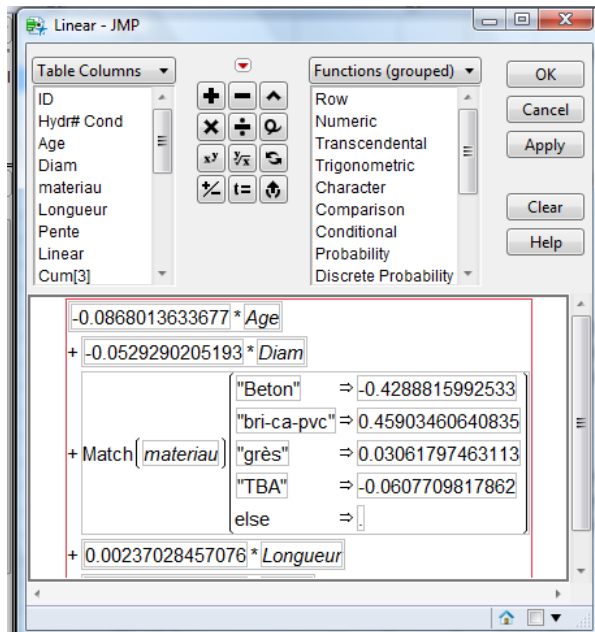


Figure 4.8 Modèle de régression pour la classe 3

- Appliquer les équations obtenues à une conduite quelconque, en remplaçant les paramètres prédictifs par les valeurs caractérisant la conduite considérée. Maintenir tous les paramètres constants à l'exception de l'âge.
- Calculer les probabilités cumulées au moyen des équations (10 et 12) pour chaque classe de détérioration.
- Les matrices de transitions sont obtenues à partir des probabilités calculées à l'étape précédente
- Appliquer l'équation 17 pour chaque type de matériau, faire un graphique représentant la condition de la conduite (score) en fonction de l'âge.

CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE

Le modèle que nous avons développé offre d'une manière générale une prédiction supérieure à 50% en moyenne quelle que soit la transition considérée, soit 54% pour celles impliquant les classes 1, 2 et 59% pour la classe 3. Ce résultat est acceptable dans la mesure où il existe une disparité en ce qui concerne la taille des classes de l'échantillon. Pour les cas que nous avons traités, à savoir la municipalité de Verdun à Montréal et la ville de St Hyacinthe, nous avons à peine 3 conduites de classe 1 (excellent). Les autres classes comptaient davantage des conduites, permettant de ce fait une analyse appropriée : 68 pour la classe 2 ; 243 pour la classe 3 et 144 pour la classe 4).

Au demeurant, le modèle d'un point de vue méthodologique est une avancée par rapport à l'approche déterministe qui consiste à modéliser la détérioration de manière linéaire comme le montre les résultats obtenus par Chughtai (2008). La nature latente du processus de dégradation est largement prise en compte et les résultats sont présentés sous forme des probabilités ; ce qui paraît adapté étant donné que plusieurs facteurs dont la nature n'est pas forcément connue et pour lesquelles les incidences sur la conduite sont difficiles à évaluer influencent tout de même son état.

De plus, comparativement aux résultats qu'on peut obtenir avec la régression logistique binaire, nos résultats sont plus détaillés. En effet, le modèle élaboré donne non seulement les probabilités de transition pour chacune des conduites mais aussi détermine sa classe d'appartenance au regard de ses caractéristiques intrinsèques. La régression logistique binaire quant à elle ne se limite qu'à déterminer la possibilité d'être en bon état ou de ne pas l'être.

Il convient d'ajouter que les facteurs utilisés pour le développement du modèle étaient significatifs à différents degrés. Ainsi pour la classe 1 l'âge et le diamètre sont significatifs à un niveau de confiance correspondant à 95% alors que le matériau est significatif pour un niveau correspondant à 90%.

La longueur et la pente se sont révélés non significatifs pour les statistiques calculées, $p > 0.1$. En effet, les réseaux qui ont servi pour l'établissement de ces modèles présentent une pente moyenne de 0.34% pour St Hyacinthe et 0.71% pour Verdun. D'un point de vue hydraulique, la pente la pente jouerait sans doute un rôle important si la zone considérée présente une topométrie plus

raide. La longueur n'a pas d'influence majeure pour le modèle dans la mesure où, les conduites sont posées sur des rues droites avec très peu des coudes qui généralement occasionnent l'accumulation des débris lorsque les conduites prennent un virage important. L'âge reste significatif à 95% pour toutes les classes alors que le diamètre et le matériau le sont à 90% pour la classe 2 et ne le sont pas du tout pour la classe 3. Ce résultat établi sans conteste le rôle que joue le paramètre âge dans la détérioration des conduites. Cette singularité a été démontrée dans tous les travaux traitant de la dégradation structurale et hydraulique des conduites d'assainissement urbain indépendamment des méthodes utilisées, qu'elles soient déterministes, probabilistes ou basées sur l'intelligence artificielle.

En comparant les différentes probabilités de transitions pour le béton, le béton armé et le grès (figure 5.1 à 5.9), on se rend compte que la probabilité qu'une conduite reste à l'état 1 (excellent) après une année de service est d'environ 68% pour une conduite en béton et 78 pour une conduite en béton armé. Ce dernier est le matériau le plus résistant rencontré dans l'échantillon tel que discuté au chapitre 3.

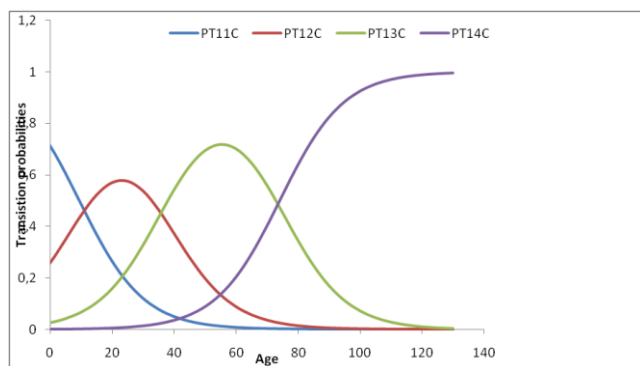


Figure 5.1 Probabilité de transitions pour la classe 1 (Béton)

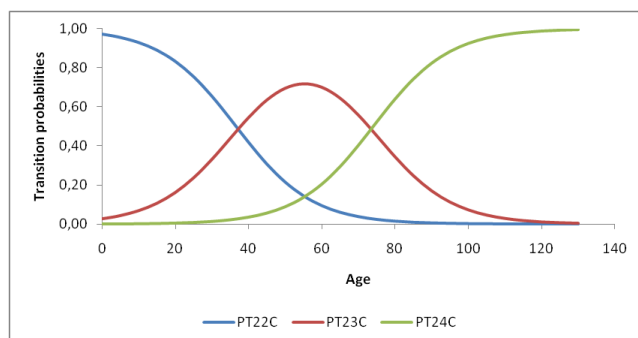


Figure 5.2 Probabilité de transitions pour la classe 2 (Béton)

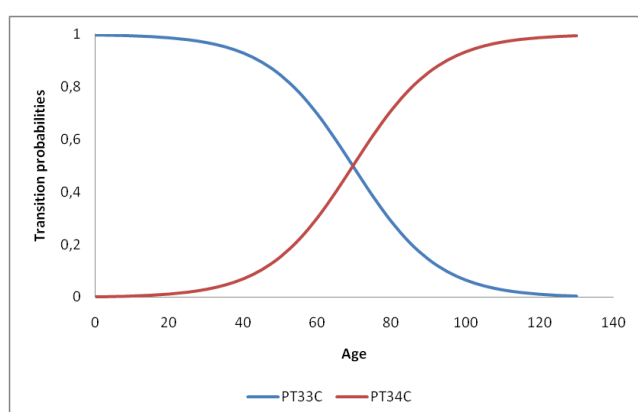


Figure 5.3 Probabilité de transitions pour la classe 3 (Béton)

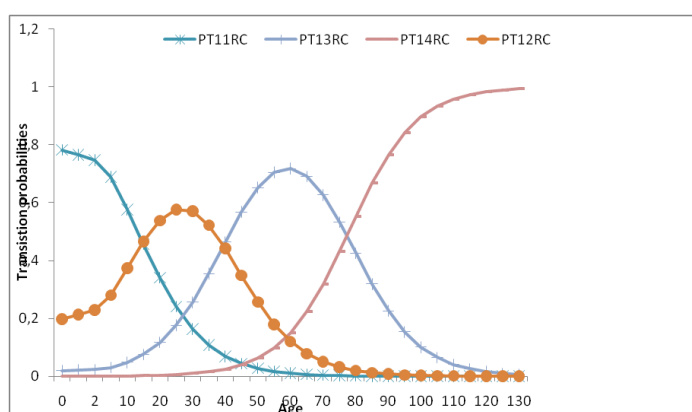


Figure 5.4 Probabilité de transitions pour la classe 1 (Béton armé)

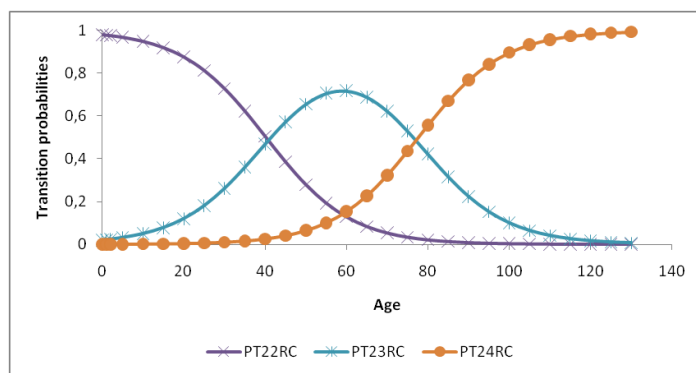


Figure 5.5 Probabilité de transitions pour la classe 2 (Béton armé)

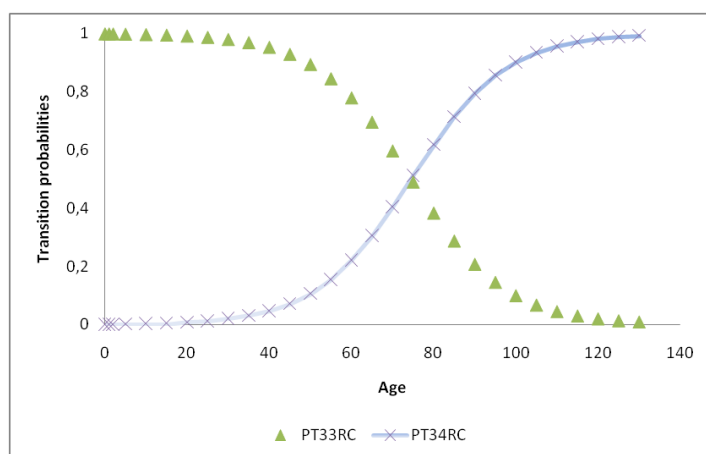


Figure 5.6 Probabilité de transitions pour la classe 3 (Béton armé)

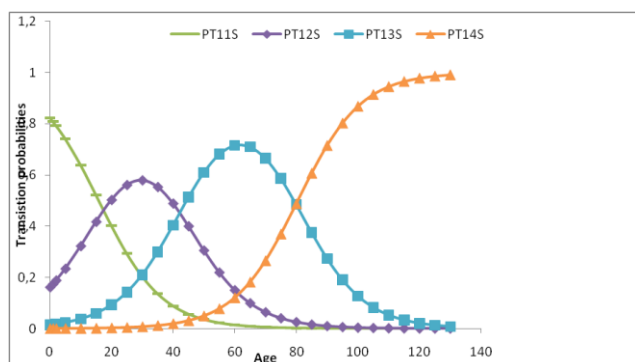


Figure 5.7 Probabilité de transitions pour la classe 1 (Grès)

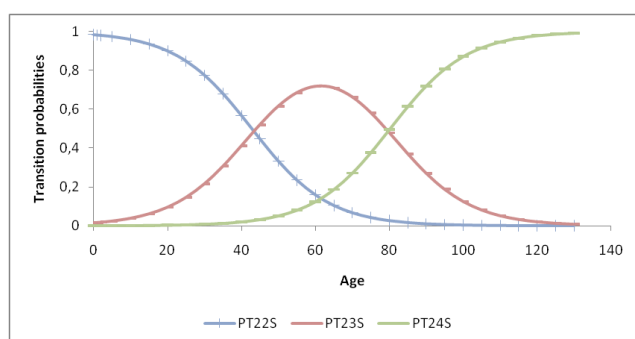


Figure 5.8 Probabilité de transitions pour la classe 2 (Grès)

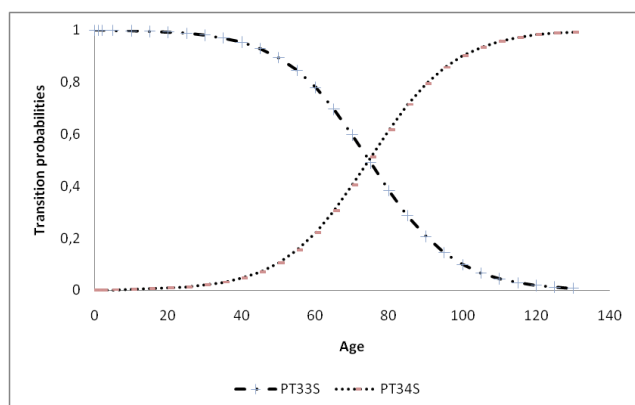


Figure 5.9 Probabilité de transitions pour la classe 1 (Grès)

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif de ce travail était d'élaborer des courbes de détérioration des conduites à partir des défauts visibles lors des inspections télévisées. Le calcul des matrices de transition de la chaîne de Markov par le modèle logit ordonné a permis de générer ces courbes pour le béton, le béton armé ainsi que le grès.

Ces courbes montrent l'évolution du score global se rapportant aux défauts d'opération et entretien en fonction du temps. Elles offrent également une première indication sur le coefficient de rugosité à utiliser dans la modélisation hydraulique du réseau d'assainissement. Les résultats obtenus sont satisfaisants sur le plan statistique, soit plus de 50% en moyenne des transitions correctement prédites pour toutes les classes nonobstant leur taille. Ce pourcentage serait sûrement plus élevé si la classe 1 était plus large. En réalité, sur le terrain, les conduites nouvellement placées sont moins nombreuses et les inspections plutôt rares.

Les travaux précédents [Baik et al. 2006] ont fait état de l'utilisation de plus d'une observation pour parvenir à un modèle efficient. Cependant, force est de constater que cette précaution ne réglerait pas définitivement le problème compte tenu du caractère intempestif et aléatoire des phénomènes conduisant à la détérioration des conduites. De plus, les conduites étant autonettoyantes, les défauts observés à un moment t ne pourraient pas nécessairement être observés au moment $t+1$ si dans l'entretemps des précipitations d'une récurrence élevée étaient prises en charge par le réseau. C'est pourquoi nous estimons qu'il serait judicieux d'introduire d'autres paramètres dans le modèle afin de l'améliorer, nous pensons notamment aux opérations d'entretien et maintenance. La fréquence de ces travaux devrait être un facteur dont il faille prendre compte dans la modélisation afin de pouvoir la rendre plus proches des conditions réelles.

Il nous paraît aussi indiqué d'étudier la détérioration des conduites en fonction de la qualité des effluents charriés. En effet, les mesures de certains paramètres de la qualité tels que l'acidité, la minéralisation, la concentration des matières organiques associés à des facteurs qui ont été relevés dans cette étude pourraient contribuer à travers un modèle à une meilleure prédiction du phénomène de détérioration.

Malgré ses limites, ce modèle peut fournir des précieuses informations aux ingénieurs et gestionnaires des réseaux d'assainissement.

BIBLIOGRAPHIE

- Agresti, A. (2002). Categorical data analysis, second edition. Wiley series in probability and statistics.
- Bababi, J. (2007), Development of an asset management plan for municipal water infrastructure.
- Baik H.S.; Jeong, H.S.D & Abraham, D.M. Estimating Transition Probabilities in Markov Chain-based Deterioration Models for Management of Wastewater Systems. Journal of water resources planning and management. Vol 132, No 1. January 1, 2006. 15-24
- Balacheff N. (1991) Contribution de la didactique et de l'épistémologie aux recherches en EIAO. in Bellissant C. (ed) *Actes des XIII^e Journées francophones sur l'informatique* (pp.9-38). Grenoble : IMAG.
- Carlier, M. (1986) Hydraulique générale et appliquée. Collection de la direction des études et recherches d'EDF, Éditions Eyrolle.
- CERIU/NASSCO (2001) : Programme du PACP certification visant l'évaluation de l'état des conduites. CERIU-Version 4.3.1 VF
- Chungtai, F. & Zayed, T. (2008). Infrastructure condition prediction models for sustainable sewer pipelines. Journal of performance of constructed facilities, Vol.22, No.5, 333-341.
- Hassoun, M.H. (1995) Fundamentals of Artificial Neural Networks. The MIT press, pp. 511. Cambridge, Massachusetts
- Kleiner, Y (2001): Scheduling inspection and renewal of large infrastructure assets. J Infrastructure systems, 12, 136-143.
- Kleiner, Y., Sadiq, R. & Rajani, B. (2006). Modeling the deterioration of buried infrastructure as a fuzzy Markov process. Journal of Water Supply Research and Technology: Aqua, v. 55, No. 2, pp. 67-80.
- Koo, D.H and Ariaratnam, S.T (2006) Innovative method for assessment of underground sewer pipe condition. Elsevier. Automation in construction 15, 479-488
- Leung, F. H. F., Lam, H. K., Ling, S. H. & Tam, K. S. (2003). Tuning of the Structure and Parameters of a Neural Network Using an Improved Genetic Algorithm. IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 14, No. 1, pp. 79-88.

Madanat, S.M., Mishalini, R. & Wan Ibrahim, W.H. (1995). Estimation of infrastructures transition probabilities from condition rating data. *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, 1(2), 120-125.

Mailhot, A., Duchesne, S., Musso, E. & Villeneuve, J.P. (2000). Modélisation de l'évolution de l'état structural des réseaux d'égout : application à une municipalité du Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.27, 65-72.

Micevski, T., Kuczera, G. & Coombes, P. (2002). Markov model for storm water pipe deterioration. *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.8, No.2, pp. 49-56.

Morcous, G., Rivard, H. & Hanna, M. A. (2002b). Case-Based Reasoning System for Modeling Infrastructure Deterioration. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 16, No. 2, pp. 104-114.

Musy, A. (1998) Principes de modélisation. In H*G*A (éd), *Hydrologie Appliquée* (pp207-242). Bucarest.

Norusis, M.J. (2010). *PASW Statistics 18 Guide to Data analysis*, 1st edition. Prentice Hall Press.

Pollert, J., Ugarelli, R., Saegrov, S., Schilling, W. & Di Federico, (2005). The hydraulic capacity of deteriorating sewer systems. *Water Science & Technology* Vol 52 No 12 pp 207-214.

Ross, M.S. (1996). *Stochastic Processes*. Second Edition. Wiley Series in Probability and Statistics

Tran, H.D. (2007) investigation of deterioration models for stormwater pipe system. PhD dissertation. School of Architectural, Civil and Mechanical Engineering. Faculty of Health, Engineering and Science. Victoria University.

Turing, A. (2010) what is artificial intelligence?

http://www.alanturing.net/turing_archive/pages/Reference%20Articles/What%20is%20AI.html

Access on 09/12/2010

Wirahadikusumah, R., Abraham, D. & Iseley, T. (2001). Challenging issues in modeling deterioration of combined sewers. *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.7, No.2, pp. 77-84.

Wan Ibrahim, W.H. (1994): Econometric methods for estimating infrastructure deterioration models with discrete condition data and for computing transition probabilities. PhD. Dissertation, Department of Civil Engineering, Purdue University

ANNEXE 1 – Analyse des résidus

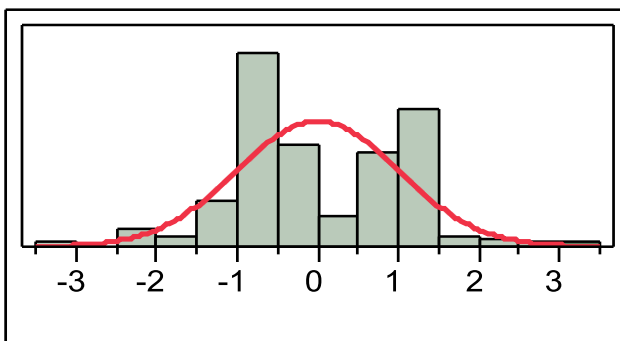


Figure (a.0.1) Résidus classe 1

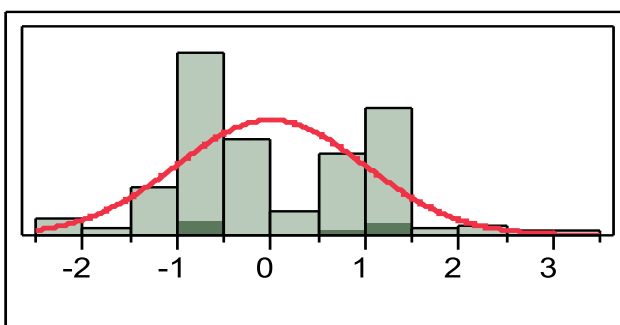


Figure (a.2) Résidus classe 2

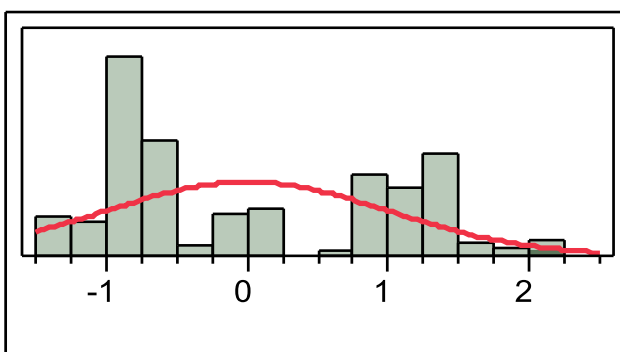


Figure (a.3) Résidus classe 3

Tableau A. Analyse des résidus - paramètres estimés

	Type	Parameter	Estimate	Lower 95%	Upper 95%
	Location	μ	0.0001534	-0.091782	0.0920889
Classe1	Dispersion	σ	1.0011886	0.9402786	1.0706009
	-2log(Likelihood)=1299.835809309				
	Location	μ	0.0001697	-0.092063	0.0924028
Classe2	Dispersion	σ	1.0011176	0.9400235	1.0707698
	-2log(Likelihood)=1291.250540204				
	Location	μ	0.0002478	-0.099802	0.1002979
Classe3	Dispersion	σ	1.0010616	0.9351539	1.0770403
	-2log(Likelihood) =1098.079629951				

Tableau B. Shapiro-Wilk W Test

Classes	W	Prob<W
Classe 1	0.942122	0.0001*
Classe 2	0.936605	0.0001*
Classe 3	0.875256	0.0000*

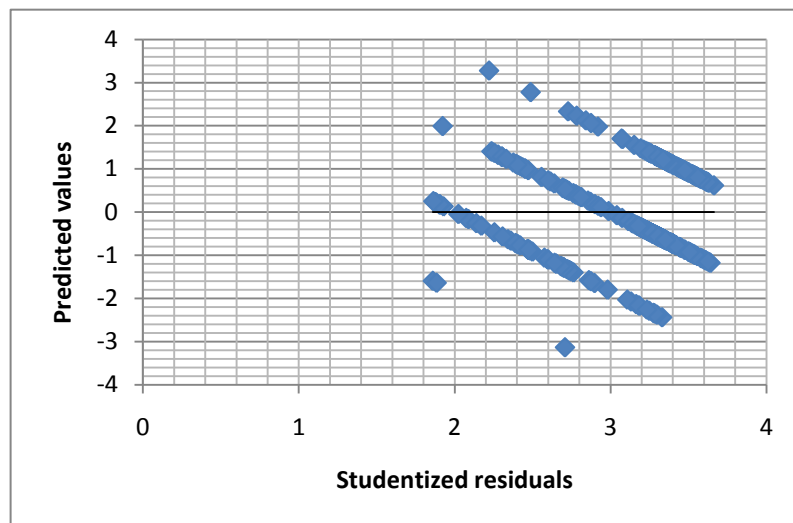


Figure (a.4) Valeurs prévues Vs Résidus de Student

ANNEXE 2 - Exemple des données utilisées

ID	Classe	Age	Dia. en m	Matériau	Long.en m	Pente(%)
CC0936	4	50	0,45	TBA	108	0,15
CC0928	3	30	0,45	TBA	97,5	0,23
CC0937A	3	50	0,45	Béton	121	0,15
CC0912	3	50	0,45	Béton	11,9	0,06
CC0911	2	50	0,45	Béton	7,7	0,57
CC0427A	2	46	0,3	Béton	102,1	0,33
CS0348	3	37	0,25	bri-ca-pvc	72,9	0,39
CS0381	2	31	0,2	bri-ca-pvc	87	0,31
CS0337	2	37	0,2	bri-ca-pvc	89,9	0,69
CS0347	2	37	0,25	bri-ca-pvc	83,8	0,42
CS0343	2	37	0,25	bri-ca-pvc	15,9	0,19
CC0359	4	49	1,2	TBA	91,4	0,21
CC0481	4	53	1,5	TBA	100	0,13
CC0485	3	53	1,5	TBA	94	0,00
CC0366	2	49	1,2	TBA	91,6	0,35
CC0364	3	49	1,2	TBA	94,7	0,13
CC0368	3	49	1,5	TBA	50	0,14
CC0501	2	53	1,5	TBA	29,1	0,06
CS0292	3	33	0,2	bri-ca-pvc	30	4,30
CS0295	3	37	0,3	bri-ca-pvc	21	0,88
CS0301	3	37	0,2	bri-ca-pvc	34	0,34
CS0280	2	37	0,3	bri-ca-pvc	84,5	0,39
CC0427	4	46	0,45	TBA	129	0,33
CC0426	3	46	0,375	TBA	128,7	0,37
CC0483	3	46	0,6	TBA	129	0,31
CS0164	3	44	0,2	bri-ca-pvc	90,3	0,58
CS0255A	3	30	0,2	bri-ca-pvc	75,2	0,34
CS0167	2	37	0,2	bri-ca-pvc	69,3	0,72
CS1065	2	37	0,2	bri-ca-pvc	60,8	0,52
CS2163F	2	37	0,2	bri-ca-pvc	3,9	0,54
CC0913	2	39	0,6	TBA	89,7	0,48
CC0132A	2	35	0,38	Béton	100,7	0,11
CS0285	3	37	0,2	bri-ca-pvc	137,4	0,70
CS1200	2	8	0,375	bri-ca-pvc	80,1	0,21

